Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 8/07 AUGUST 2007

WAHRNEHMUNG
Wie Formen Farbtäuschungen erzeugen

PHYSIK
Neutrinoteleskop im ewigen Eis

DINOSAURIER
Massengrab auf Madagaskar

Wie sich unser Immunsystem selbst kontrolliert

Bei Versagen drohen Arthritis, Diabetes und multiple Sklerose

6,90 € (D/A) · 13,50 sFr / Luxemburg 8,– €
D6179E

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Die Rationalität der Irrationalität

Wer seine Nase aufs Papier drückte und dann langsam den Abstand vergrößerte, der konnte plötzlich hoppelnde Hasen im Blumenfeld erkennen, wo vorher nur graubuntes Pixelgewirr das Bild bedeckte. Als diese so genannten Autostereogramme vor etlichen Jahren aufkamen, bescherten sie den Verlagen Bestsellererfolge. Groß war der Reiz, das eigene Hirn auszutricksen, in diesem Fall beim räumlichen Sehen.

Wahrnehmungspsychologen und Kognitionsforscher befassen sich schon lange mit optischen Täuschungen. Kein Wunder, lernen die Forscher doch vor allem aus Fehlreaktionen, wie unsere Wahrnehmung funktioniert. An solchen Illusionen herrscht kein Mangel – ob mit falschen Perspektiven, rotierenden Spiralen, springenden Punkten, sich kreuzenden Parallelen, verfälschten Farben oder nicht vorhandenen Kreisen. Das Hirn ergänzt, verschiebt, versetzt, dreht, färbt um – alles, um nur irgendwie einen sinnvollen Eindruck zu erzeugen. Auch die Autoren unseres Artikels auf S. 32 – drei Psychophysiker, darunter Lothar Spillmann vom Neurozentrum der Universität Freiburg – arbeiten seit Langem hart daran, den Menschen hinters Licht zu führen. Ihre speziellen farbigen Täuschungen zeigen, dass und wie das Gehirn Farben und Formen simultan verarbeitet. Ihr Resümee: Die Formwahrnehmung verfälscht das Farbempfinden. Warum das aber so ist, darüber sind sich Hirnforscher noch weit gehend uneins.

Sind Sie heute schon irrational gewesen? Sich so zu verhalten ist ja gemeinhin verpönt. Gleichwohl tun wir das alle. Statt nur das eigene Wohl im Auge zu behalten – das versteht die klassische Wirtschaftstheorie unter rational –, lassen wir uns häufig von so sachfremden Motiven wie Fairness oder Rache leiten (siehe unser Spektrum-Dossier 5/2006 »Fairness – Kooperation – Demokratie«). Oder wir verstricken uns in dem Wechselspiel unserer Vermutungen darüber, was unser Spielpartner denkt, und dessen Vermutungen über unser Denken. Ein solches Wechselspiel war zuletzt Thema unseres Preisausschreibens im Juli-Heft (S. 96).

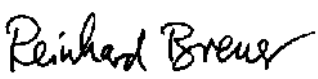
Es kommt aber noch schlimmer. Selbst in einer Situation, in welcher der blanke Egoismus nicht durch Kooperationswillen, Altruismus oder dergleichen modifiziert wird, verhalten sich Menschen nicht rational im Sinn der klassischen Spieltheorie. Wie der Artikel des Wirtschaftswissenschaftlers Kaushik Basu von der Cornell-Universität belegt, lassen sich die Allermeisten auf das intensive Nachdenken über das Nachdenken des Spielpartners gar nicht erst ein – und liegen damit richtig! Den maximalen Nutzen fährt ein, so zeigt sich, wer nicht dauernd versucht, seinen Nutzen zu maximieren.

Psychophysiker Lothar Spillmann, Universität Freiburg

Wirtschaftswissenschaftler Kaushik Basu, Cornell-Universität

Offenbar kann es manchmal rational sein, sich irrational zu verhalten (S. 82).

Herzlich Ihr



INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Emanzipiert dank Hormonrezeptor · Gesunde Würze · Widriges Wetter im Weltall · Austreibung des Aids-Virus u. a.

13 **Bild des Monats**
Die Wasseradern Amazoniens

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Rekord-Supernova**
Die stärkste je beobachtete Sternexplosion

16 **Ersatzorgane aus Bindegewebe?**
Genmanipulation verwandelt Fibroblasten in embryonale Stammzellen

20 **Die Nussknacker von Noulo**
Schon vor 4300 Jahren benutzten Schimpansen Werkzeuge

THEMEN

▶ **24** VORZEIT
Was Massengräber von Dinosauriern auf Madagaskar verraten

▶ **32** WAHRNEHMUNG
Überraschender Zusammenhang zwischen Form und Farbeindruck

▶ **38** ASTRONOMIE
IceCube – Neutrinojagd am Südpol

48 INTERVIEW
Bedroht Dunkle Energie die astronomische Forschungskultur?

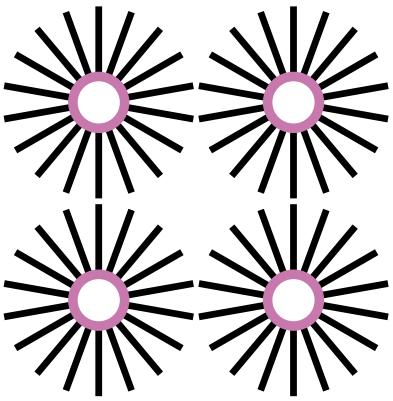
▶ **54** TITELTHEMA ABWEHRZELLEN
Segensreiche Friedensstifter im Immunsystem

62 UMWELTTECHNIK
Diesel ohne Ruß und Stickoxide

74 CHEMIE
Molekülbausatz für die Nanotechnik

82 SPIELTHEORIE
Unvernunft als Gewinnstrategie

102 ESSAY
Die Quadratwurzel, das Irrationale und der Tod



SEITE 32

WAHRNEHMUNG

Wie Formen Farben verfälschen

Bestimmte optische Täuschungen zeigen, dass das Gehirn Farbe nicht immer getrennt von Form und Tiefe verarbeitet

SEITE 38

ASTRONOMIE

Neutrinojagd am Südpol

Tief ins antarktische Eis, wo es sicher vor kosmischen Störsignalen ist, wird derzeit das Neutrinoteleskop IceCube eingelassen. Hat es Anfang 2011 erstmals seine volle Leistung erreicht, soll es neue kosmische Quellen erschließen

SEITE 48

INTERVIEW

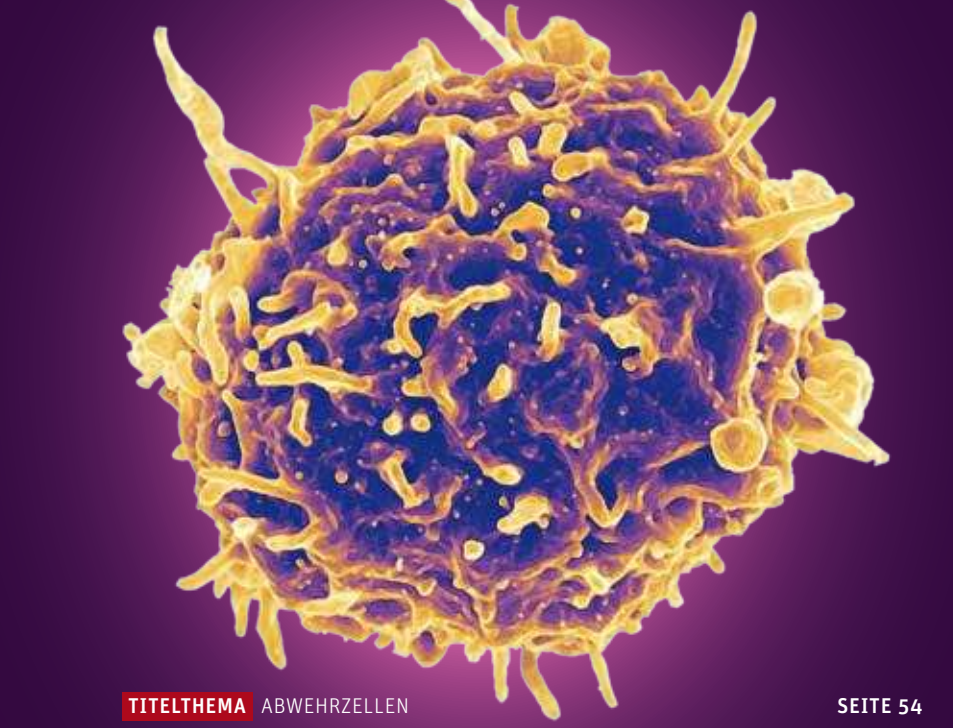
Ist die astronomische Forschungskultur gefährdet?

Langfristig angelegte Großprojekte wie die zur Dunklen Energie treiben kreative und motivierte Wissenschaftler in andere Forschungsgebiete, sagt **Simon White**, Direktor des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in Garching

DINOSAURIER SEITE 24

Tod am Wasserloch

Wiederholte Dürrekatastrophen auf Madagaskar schufen Massengräber für Dinosaurier, die an den letzten Wasserstellen verendeten



TITELTHEMA ABWEHRZELLEN SEITE 54

Wer zügelt das Immunsystem?

Noch nicht lange bekannte regulatorische Zellen bieten neuartige Ansatzpunkte, beispielsweise Autoimmunerkrankungen und die Abstoßung von Transplantaten zu unterdrücken

SEITE 62

SERIE AUTO UND UMWELT (TEIL III): DIESELMOTOREN

Projekt »sauberer Diesel«

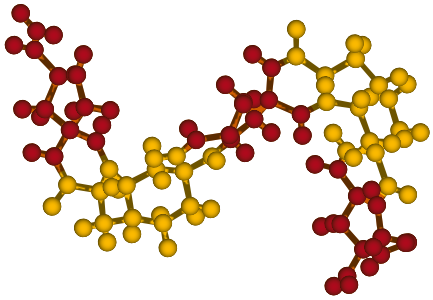
Vorbei die Zeiten der »Dreckschleuder« – Katalysatoren, Filter und Biokraftstoffe sollen den Diesel zum Vorreiter umweltfreundlicher Motortechnik machen

SEITE 74

NANOCHEMIE

Lego mit Molekülen

Ein geschickt konstruierter Satz molekularer Bauklötzchen erlaubt, auf einfache Weise die verschiedensten Strukturen für die Nanotechnik und Medizin zusammenzubauen



SEITE 48

SPIELTHEORIE

Das Urlauberdilemma

Was die Spieltheorie eine »rationale Strategie« nennt, bereitet den Beteiligten in dieser Situation große Nachteile. Es handelt auch praktisch niemand nach dieser Strategie

KOMMENTAR

23 SPRINGERS EINWÜRFE
Der Charme einfacher Weltbilder

WISSENSCHAFT IM ...

46 **Alltag:** Atomzeit für alle – die Funkuhr

73 **Rückblick:** Solarenergie statt Flugbenzin · Schwingende Ohrmuschel · Mit Petroleum gegen Mücken u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

89 **Geniale Ideen zu Gift und Gülle**
Bundeswettbewerb Jugend forscht 2007 (Teil II)

REZENSIONEN

92 **Messel** von Gabriele Gruber und Norbert Micklich (Hg.)
Psychiatrie, Psychoanalyse und die neue Biologie des Geistes von Eric. R. Kandel
Eins, zwei, drei ... unendlich
von Rudolf Kippenhahn
Geschichte des Ingenieurs
von Walter Kaiser und Wolfgang König (Hg.)
Wege zur Wissenschaft
von István Hargittai

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

98 **Schach auf dem Sechsecksbrett**
Verkleinerte Mannschaften, ungewohntes Spielfeld, rasanteres Spiel

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Quantenspuk und Realität

8 **Leserbriefe**

9 **Impressum**

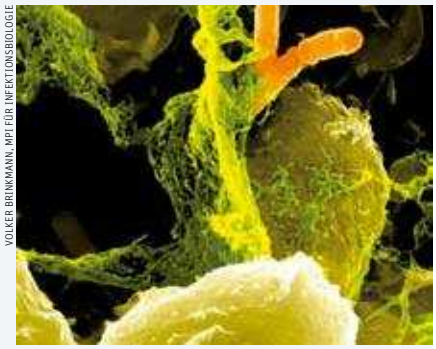
97 **Preisrätsel-Lösung**

106 **Vorschau**

Titelmotiv (regulatorische T-Zelle): Kim J. Hasenkrug und David W. Dorward

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Spektrum ONLINE



VOLKER BRINKMANN, MPI FÜR INFEKTIONSBIOLOGIE

◀ IMMUNSYSTEM

Die Abwehr unseres Körpers

Ständig versuchen Viren, Bakterien und Parasiten in unseren Körper einzudringen – meist ohne Erfolg. Denn der Körper setzt eine komplizierte Abwehrkette gegen jeden Eindringling ein. Doch mitunter versagt das Immunsystem, und manchmal – bei Autoimmunkrankheiten – tut es zu viel des Guten

www.spektrumdirekt.de/immunsystem

DINOSAURIER-FREILICHTMUSEUM MÜNCHEHAGEN

◀ DINOSAURIER

Auf den Spuren der urzeitlichen Kreaturen

Tyrannosaurus rex gilt unter ihnen als uneingeschränkter Star, doch die Welt der Dinosaurier hat noch viel mehr zu bieten. Zahlreiche neue Erkenntnisse zum Leben und Sterben im Erdmittelalter konnten Paläontologen inzwischen zusammentragen

www.spektrumdirekt.de/dinosaurier

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt

	1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■
Didaktik	■ ■ ■ ■
Suchen/Finden	■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■
Preis/Leistung	■ ■ ■ ■
Gesamtpunktzahl	22

◀ REZENSION

Thomas Bührke und Roland Wengenmayr (Hg.): Erneuerbare Energie

Ist die Versorgung unserer Gesellschaft mit Strom, Wärme und Treibstoffen zukünftig ausreichend gesichert? Thomas Bührke und Roland Wengenmayr prophezeien, dass das 21. Jahrhundert zu jenem von Sonnen-, Wind- und Wasserkraft und eventuell auch der Erdwärme werden wird. Ihre Beiträge stellen sie in erstklassigen und leicht lesbaren Artikeln vor *Aus der Rezension von Richard Mischak*

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter

www.spektrumdirekt.de/5x5

◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Es lebe der Tod!

Thrakiens Fürsten waren reich und wie versessen auf ein Wohlleben auch im Jenseits. Ihre Gräber statteten sie dementsprechend mit prunkvollen Beigaben aus, wie ein Sensationsfund in Griechenland nun belegt. **Unsere Autorin berichtet exklusiv für Spektrum der Wissenschaft**

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

PUBLIKATIONEN

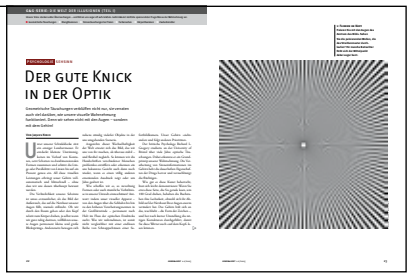
zu Themen
in diesem Heft

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 32

SEHSINN

Der gute Knick in der Optik

Geometrische Täuschungen verraten viel darüber, wie unsere Wahrnehmung funktioniert



Kostenlose Leseprobe unter www.gehirn-und-geist.de/artikel/831878

G&G 1-2/2005
Wozu Religion?

Raus aus der Schicksalsfalle

Forschung mit Folgen

Wortstau im Gehirn

Teure Rituale

Diese Ausgabe ist nur als Digitalversion verfügbar.

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 38

KOSMISCHE STRAHLUNG

Die Suche nach den Quellen

Aus den Tiefen des Weltraums trifft ein beständiger Strom hochenergetischer Teilchen auf die Erde. Mit Hilfe neuer Experimente wollen Astronomen die Quellen ermitteln

SUW 4/2006
Totale Sonnenfinsternis

Auf dem Weg zu Pluto

Sonnenbeobachtung mit Telezentrik

Das Observatorium »Pierre Auger«

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 24

PALÄONTOLOGIE

Madagaskar und die ersten Dinosaurier

Neue Fossilien von Madagaskar zeigen: Dinosaurier entstanden viel früher als bislang angenommen

SDW DOSSIER 1/2005
Tiere der Urzeit

Zuerst kam die Feder

Szenen aus dem Bernsteinwald

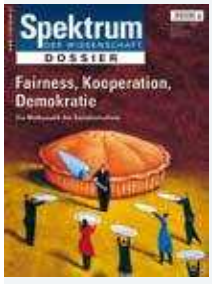
Die Wahrheit über *Tyrannosaurus rex*

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 102

FAIRNESS

Die Mathematik der Gerechtigkeit

Ein Prinzip, das hinter einer Lehre des Talmuds steckt, hilft – in mathematische Form gegossen –, oft befriedigende Lösungen zu finden



SDW DOSSIER 5/2006
Fairness, Kooperation, Demokratie

Wer wird Präsident?

Das Täter-Opfer-Dilemma

Spiele auf Leben und Tod

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-743

KENN BROWN

Methan produzierende Bakterien auf Pflanzen

Methan, Pflanzen und Klimawandel
Mai 2007

Der Artikel von den Physikern Keppler und Röckmann, die ihre Ergebnisse vor geraumer Zeit in Gießen vortrugen, erwähnt mit keinem Wort, dass Mikroorganismen zahlreich die Phyllosphäre von Pflanzen besiedeln. Darunter dürften sich auch methanogene Bakterien befinden, die bei der Umwandlung von CO_2 oder Acetat in CH_4 Energie gewinnen und als Folge Methan freisetzen.

Pflanzen versuchen den stomatären Bereich vor mikrobieller Besiedelung zu schützen, um ein Eindringen in den interzellulären Bereich zu verhindern. Dies gelingt weit gehend, aber nicht immer vollständig. Methanogene Blattbesiedeler könnten daher durchaus für sie günstige Lebensumstände vorfinden und Methan, das die Autoren dem pflanzlichen Metabolismus zuschreiben, an die Atmosphäre abgeben.

Dr. Gero Benckiser, Gießen

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Preise des Abonnements erhöhen sich ab August pro Heft einschließlich Versand auf € 6,60 (Ausland € 7,20), für Schüler und Studenten auf € 5,50 (Ausland € 6,15). Der Einzelverkaufspreis wird ab der September-Ausgabe € 7,40 betragen. Wir bitten um Ihr Verständnis. *Die Verlagsleitung*

Ob Pflanzen Methan produzieren und so zum Treibhauseffekt beitragen, wird heiß diskutiert.

Berechnung der Massenträgheit

Öltanker ist kein Vergleich
Leserbrief – Kasten, April 2007

Den interessanten und erfreulichen Ausführungen und Berechnungen von Horst und Erich Marschall zur verschwindenden Massenträgheit Indiens ist eine kleine Korrektur anzubringen: Bei der Berechnung der Massenträgheit darf man nicht einfach nur die Masse des indischen Subkontinents verrechnen, sondern muss die Masse der gesamten indischen Lithosphärenplatte (das heißt indischer Subkontinent zuzüglich der ozeanischen Areale dieser Platte) mitberücksichtigen. Es ist ja nicht nur der Kontinent, der driftet (der auf Alfred Wegener zurückgehende Terminus »Kontinentaldrift« ist konsequent abzulehnen), sondern auch die ganze ozeanische Umgebung des Kontinents.

Allerdings verändert dies die Resultate von H. und E. Marschall nur sehr geringfügig. Selbst wenn man die erhaltene kinetische Energie noch mit dem (großzügig veranschlagten) Faktor 10 multipliziert, so bleibt die Trägheit verschwindend klein im Vergleich zu anderen orogenetischen Energien.

Dominik Letsch, Zollikon, Schweiz

Irrtümer durch Fehlmessungen

Johannas falsche Knochen
Springers Einwürfe, Juni 2007

Wenn man schon den Absolutheitsanspruch vertritt, keine einzige Reliquie der Christenheit sei echt, so sollte man doch berücksichtigen, dass auch die Naturwissenschaft Irrtümern – hier Fehlmessungen – unterliegen kann, so beim angeführten Turiner Grabtuch (TG) im Jahr 1988: Die Radiokarbonmethode darf nur bei organisch »reinen« Stoffen angewandt werden und führt bei »verschmutzten« Materialien zur verkürzten Altersbestimmung! So beim TG (Datierung ins 13./14. Jahrhundert), dessen Proben Umwelteinflüssen wie Weihrauch, Kerzenruß und sogar Brandspuren ausgesetzt waren, wodurch der ursprüngliche Kohlenstoffanteil (Konzentration) des zerfallenden C-14-Isotops verfälscht wurde.

Für die Echtheit des TG spricht vielmehr – das ist freilich noch kein Beweis –, dass ein Gremium unabhängiger, internationaler Wissenschaftler bei dessen Analyse zahlreiche Übereinstimmungen mit bekannten Fakten aus der Zeit Christi festgestellt hat, wie etwa: Pollenkörner im Gewebe und Texturen des Tuchgewebes aus dem damaligen Raum Palästina, Abdrücke römischer Münzen, Kreuzigung durch die Handgelenke statt durch die Handteller hindurch, Konvergenz zu den Passionsberichten der Evangelien. Übrigens handelt es sich beim Abbild auf dem TG um den nicht erklärbaren »Negativabdruck« eines menschlichen Körpers, der wiederum erst im fotografischen Negativ »positiv«, also real, erscheint.

Paul Kalbhen, Gummersbach

Besitzstandswahrung

Der Strichpunkt-Krieg
Essay, Juni 2007

Möglicherweise übersieht der Autor den Hauptgrund für die seltsame Vermehrung der Programmiersprachen.

Die überwiegende Mehrzahl der heute zu realisierenden Programme sind Anwenderprogramme, die auf weit gehend standardisierten, windowsähnlichen Betriebssystemen mit grafischer Benutzeroberfläche laufen sollen. Sie werden nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt, wobei die Fenster und sonstigen Elemente der Benutzerschnittstelle ohne weitere Programmierkenntnisse grafisch zusammengestellt werden können. Der Programmcode besteht zum überwiegenden Teil aus Aufrufen an die (Objekt-)Bibliothek des verwendeten Entwicklungssystems. Ob diese in Pascal, Fortran, C++ oder Visual Basic erfolgen, ist vollkommen belanglos.

Ein großer Teil der Programme ist zudem weder besonders kritisch noch werden ausgefeilte Datensicherungsmechanismen verlangt. Beschränkt man sich auf relativ einfache Programmierstile (etwa keine mehrdimensionalen Arrays, keine Pointer-Jongliererei), so können sogar Personen, die noch nie programmiert haben, direkt in den Entwick-

lungsprozess einbezogen werden. Derzeit arbeite ich in einem kleinen Pilotprojekt bei einer UN-Organisation, in der genau diese Vorgehensweise praktiziert wird.

Von den Anwendern selbst erstellte Programme bedrohen natürlich die Existenz von IT-Experten. Somit ist die Erfindung immer neuer Programmiersprachen vor allem auch als Akt der Besitzstandswahrung zu sehen. Programmieren muss kompliziert bleiben. Dies hatten die Autoren des Spektrum-Artikels »Mehr Tempo auf der Datenautobahn« schon 1999 mit Blick auf XML genau so ausgedrückt. Sie argumentierten, mit der Einführung von XML würde die Erstellung von Webseiten endlich so kompliziert, dass sie nur noch von professionellen Teams geleistet werden könnte. Damit seien die Tage der »Selfmade-Internet-Experten« gezählt.

Christian Gapp, Bonn

Totale Aufzeichnung verändert das Leben

Erinnerung total, Mai 2007

In dem Film »The Final Cut« mit Robin Williams wurde der Ansatz der kompletten Speicherung aller Erinnerungen auf einer Art Chip bereits 2004 thematisiert. Was in Ihrem Artikel wohl viel zu kurz kommt, wird hier besonders hervorgehoben:

Inwieweit verändere ich mein Verhalten, wenn ich weiß, dass ich 24/7 aufgezeichnet werde? (»Was denken die Leute in 30 Jahren von mir?«) Inwieweit werden gar Menschenrechte verletzt – vertrauliche Informationen, eventuell einfach nur äußerst persönliche Informationen, natürlich ganz zu schweigen vom Missbrauch dieser Daten?

Der Film »spielt« gar mit Menschenrechtsbewegungen gegen die »totale Aufzeichnung« und einer Untergrund-Szene, die sich mit dem Loswerden solcher Implantate beschäftigt.

Thomas Schneider, Köln

Keine Energie vergeuden

Wolkige Projektionen, April 2007

Es sollte eigentlich bekannt sein, dass es kein validiertes Klimamodell gibt. Aber die Tatsache, dass die Bildung der fossilen Primärenergieträger Kohle, Öl und Gas grob 200 000 000 Jahre beansprucht hat und wir dabei sind, diese in rund 200 Jahren zu verbrennen, sollte uns doch zu denken geben. Erstens bedeutet der Faktor 1 000 000 alles andere als Nachhaltigkeit und zweitens ist Verbrennung eine der thermodynamisch schlechtesten Arten der Energieumwandlung.

Für uns alle gilt es, Tatsachen zu akzeptieren und zu verinnerlichen und darum verantwortungsvoll zu handeln. Ob jemand als Christ oder Moslem es als Schöpfungsauftrag begreift, mit dem, was er vorfindet, behutsam umzugehen, oder ob er als Atheist auch an die Menschen denkt, die nach ihm kommen, ist unwesentlich. Wer aber heute noch Energie vergeudet, handelt verantwortungslos!

Prof. Otto Schult, Jülich

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Errata

Methan, Pflanzen und Klimawandel
Mai 2007

In der Grafik auf S. 72 ist der Verlauf von Kohlendioxid in ppm (also millionstel Teilchen) aufgezeichnet, nicht wie angegeben in ppb (milliardstel).

Ein Kosmos ohne Anfang?, Juni 2007

Hubbles Kollege Vesto Slipher hat seine Messungen am Lowell-Observatorium, Flagstaff, gemacht und nicht, wie auf S. 35 erwähnt, am Lick-Observatorium bei San Francisco.

Laser aus Silizium, Mai 2007

Im Artikel liest man von einer zehntausendfachen Verbesserung zwischen einem Megabyte und 10 Gigabit. Größenordnungsmäßig handelt es sich hier aber eher um einen Faktor 1000. Harald Kirsch, Düsseldorf

Anmerkung der Redaktion:
Der Leser hat Recht, denn 1 Byte entspricht 8 Bits.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann (Online Coordinator), Ursula Wessels; Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Jan Apetz, Dr. Werner Gans, Dr. Silke Lissek, Dr. Dr. Reinhard Löser, Thomas Mädler, Dr. Andreas Schmidt-Rhaesa, Dr. Achim Schneider.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hartmut Brendt, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4536, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-45, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

ARCHÄOLOGIE

Altpersisch nicht nur für Könige

UNIVERSITÄT CHICAGO

Dieses 2400 Jahre alte Tontäfelchen aus Persepolis trägt den ersten bekannten altpersischen Text auf einem Verwaltungsdokument.

Forscher an der Universität Chicago fanden nun erstmals ein Beispiel dafür, dass im Persischen Reich, das unter dem Königsgeschlecht der Achämeniden von etwa 550 bis 330 v. Chr. existierte, die Landessprache auch in der Verwaltung verwendet wurde. Bisher kannte man sie nur von Inschriften, die auf Palast- und Felswänden der Verherrlichung des Herrschers sowie religiösen Zwecken dienten, oder von Hoheitszeichen auf königlichen Gerätschaften. Administrative Dokumente und alltägliche Schriftstücke waren dagegen in Sprachen wie Babylonisch, Aramäisch und Elamitisch abgefasst, die im Orient schon vor dem Aufstieg des Perserreichs im 6. vorchristlichen Jahrhundert gesprochen wurden. Dadurch hatten sie eine weit größere Verbreitung als das Altpersische, das mit dem indischen Sanskrit verwandt ist.

Auch die Zehntausende von Tontäfelchen und -fragmenten, die einst bei Ausgrabungen im königlichen Palast in Persepolis im Südosten des heutigen Iran zu Tage kamen und seit 1937 beim Oriental Institute der Universität Chicago lagern, wo sie übersetzt und ausgewertet werden, schienen ausschließlich Keilschrifttexte in solchen »Fremdsprachen« zu enthalten. Nun aber stießen die Forscher bei der Entschlüsselung eines Bruchstücks überraschend auf eine Notiz in Altpersisch. Darin geht es um die Bezahlung bisher noch nicht identifizierter Handelsware aus fünf Dörfern in der Nähe von Persepolis.

Pressemitteilung der Universität Chicago

ERNÄHRUNG

Gesunde Würze

Wer Speisen würzt, möchte ihren Geschmack verbessern. Doch offenbar fördert er zugleich die Bekömmlichkeit des Essens. Forscher um Manfred Gratzel von der Universität München entdeckten in sensorischen Zellen der Schleimhaut im Magen-Darm-Trakt überraschend Rezeptoren für Thymol und Eugenol, die Aromastoffe des Thymians und der Gewürznelke. In der Nase, wo diese Rezeptoren bisher ausschließlich nachgewiesen wurden, gehören sie zum Geruchssinn. Aber was haben sie in den Verdauungsorganen zu suchen?

Um das herauszufinden, brachten die Münchner Forscher die Sensorzellen in kontrollierten Versuchen mit den Aromastoffen in Kontakt. Daraufhin nahm, wie sich zeigte, die Kalziumkonzentration im Zellplasma zu. Das wiederum regte die Produktion von Serotonin an. Der gemeinhin als Glückshormon bekannte Stoff fördert die Darmperistaltik und die Ausschüttung von Verdauungssäften, was die Zerkleinerung und den Abbau der verspeisten Lebensmittel unterstützt. Somit dienen Gewürze nicht nur dem Gaumenkitzel, sondern auch der Gesundheit.

Diese Erkenntnisse könnten zu neuen Behandlungsmethoden von Verdauungsbeschwerden wie Verstopfung, Blähungen oder Durchfall führen. *Gastroenterology, Bd. 132, S. 1890*

GEOLOGIE

Früher Zugang zum Polarmeer

Schon vor 17,5 Millionen Jahren – 7,5 Millionen Jahre früher als bisher gedacht – öffnete sich die Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen und schuf so eine Verbindung zwischen Atlantik und Arktischem Ozean. Für die Entwicklung beider Meere hatte dieser ganzjährig von Eis bedeckte Korridor große Bedeutung. Erstmals konnte so sauerstoffreiches Wasser in das arktische Becken fließen. Zudem verstärkte das Absinken kalter Wassermassen im Nordpolarmeer die großräumige Zirkulationsströmung im Atlantik, die den Golfstrom antreibt und das Klima Nordeuropas beeinflusst.

Auf das frühere Datum für die Entstehung der Framstraße führte die Auswertung mehrere hundert Meter langer Sedimentbohrkerne vom Lomonossow-Rücken. Dieses rund 3000 Meter hohe submarine Gebirge erstreckt sich nahe dem Nordpol bis einen Kilometer unter die Wasseroberfläche. Die Kerne waren bei einem groß angelegten Projekt im Sommer 2004 mit Hilfe von drei Eisbrechern gewonnen worden.

Die plötzlich Belüftung des Arktischen Ozeans zeigt sich in einem markanten Wechsel zwischen Ablagerungen mit hohem und geringem Anteil von organischem Kohlenstoff in 200 Meter Sedimenttiefe. Obwohl die Schichten kaum Fossilien enthalten, konnte sie der Paläo-Ozeanograf Martin Frank vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften in Kiel über den Zerfall eines Beryllium-Isotops jetzt exakt datieren.

Nature, Bd. 447, S. 986

MARTIN JACOBSSON, UNIVERSITÄT STOCKHOLM

Durch die schmale Framstraße erfolgt der Wasseraustausch zwischen Nordatlantik und Arktisbecken (Pfeile).

ZHAO CHUANG UND XING LIDA, IVPP

Mit dem Federkleid an Armen und Schwanz sowie dem Schnabel ähnelte *Gigantoraptor elianensis* einem Strauß, wog jedoch zehnmal so viel.

PALÄONTOLOGIE

Gefiederter Riese

Zoobesucher halten von einem Strauß meist respektvoll Abstand. Zu Recht: Mit der für einen Vogel eindrucksvollen Größe, den scharfen Krallen und dem harten, spitzen Schnabel kann das Tier einem Menschen durchaus gefährlich werden.

Nun haben chinesische Paläontologen in der Mongolei die Überreste eines Dinosauriers gefunden, der in seinem äußeren Erscheinungsbild dem afrikanischen Laufvogel ähnelte – nur wog er 1,4 Tonnen und wurde bei einer Länge von acht Metern bis zu 3,5 Meter groß.

Gefiederte, aber flugunfähige Saurier sind zwar seit Langem bekannt, doch erreichte keiner bisher solche Ausmaße. Auch unter den Fleisch fressenden Raubsauriern war *Gigantoraptor elianensis*, wie er wissenschaftlich heißt, einer der größten. Nur wenige seiner Kumpane wie *Tyrannosaurus rex* konnten mit ihm mithalten.

Das gefundene Fossil stammt von einem etwa elf Jahre alten, noch nicht ausgewachsenen Tier, das kurz vor dem Ende der Kreidezeit vor ungefähr 65 Millionen Jahren lebte. Es wird der Gruppe der Hohlknochensaurier zugeordnet, die Ähnlichkeiten mit den heutigen Vögeln aufweisen. Das Forscherteam um Xing Xu von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften entdeckte den Oberschenkelknochen des Tiers eher zufällig bei den Dreharbeiten für eine TV-Dokumentation. *Nature, Bd. 447, S. 844*

VERHALTEN

Hormongesteuerter Rollentausch

Nicht erst im Zeitalter des Elterngeldes wird es bei Männern immer beliebter, zu Hause zu bleiben, die Wohnung zu putzen und die Kinder zu hüten. In der Tierwelt ist dieser Rollentausch bei einigen Arten schon lange üblich. Das wirkt sich auch auf das Balz- und Sexualverhalten aus. So werben beim afrikanischen Grillkuckuck, der anders als sein hiesiger Verwandter kein Brutparasit ist, die Weibchen um die Männchen. Letztere bauen das Nest, brüten die Eier aus und ernähren zum großen Teil die Jungen. Die Weibchen sind derweil damit beschäftigt, das Revier zu verteidigen und sich mit anderen Männchen zu paaren – auch hier ein Verhaltensklischee mit vertauschten Vorzeichen.

Unklar war bisher, ob es einen hormonellen Hintergrund dafür gibt. Jetzt haben Forscher vom Max-Planck-Institut für Ornithologie erste Hinweise darauf gefunden. Zwar produzieren auch beim Grillkuckuck die Männchen mehr Testosteron als die Weibchen, doch sind diese weitaus empfänglicher für die Wirkung des Hormons. Sie verfügen nämlich über mehr Androgenrezeptoren im Nucleus taeniae – dem Bereich im Hirn, der territoriales und aggressives Verhalten steuert. Folglich herrscht in dieser Region bei den Weibchen größere Aktivität.

Analoge Untersuchungen an Tierarten mit konventionellem Rollenbild liegen leider nicht vor, sodass ein Vergleich bisher nicht möglich ist. *Developmental Neurobiology, Online-Vorabveröffentlichung*

WOLFGANG GOYMANN, MPI FÜR ORNITHOLOGIE

Emanzipiert dank Testosteron: Weibchen des afrikanischen Grillkuckucks

ELEKTRONIK

Die perfekte Schmelze

Künftig dürften sich Halbleiterkristalle kostengünstig in höherer Qualität herstellen lassen. Üblicherweise werden sie aus der Schmelze gezogen. Dort aber kommt es zu thermischer Konvektion, bei der an einer Stelle wärmeres Material aufsteigt und an einer anderen kühleres dafür absinkt. Solche Umwälzbewegungen verursachen Unregelmäßigkeiten im Kristall.

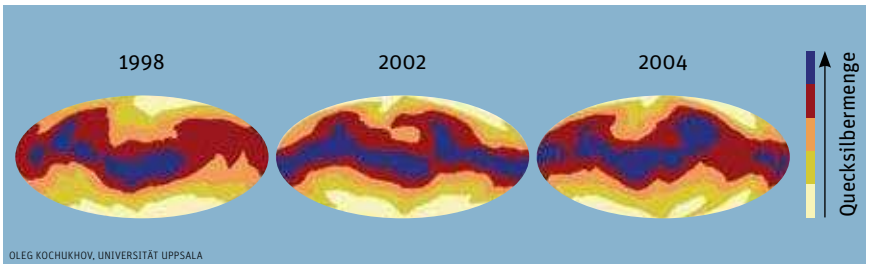
Schon länger gibt es die Idee, die schädliche Zirkulation mit wandernden Magnetfeldern zu dämpfen. Bisher haperte es jedoch an der Umsetzung in die Praxis. Die Felder mussten von Magneten außerhalb des Züchtungskessels erzeugt werden und verloren durch Abschirmungseffekte an der Kesselwand an Intensität. Da für den gewünschten Effekt oft supraleitende Magnete nötig waren, verdoppelte sich der Preis einer so ausgestatteten Anlage.

Peter Rudolph und seine Kollegen vom Berliner Institut für Kristallzüchtung umgehen das Problem nun, indem sie die wandernden Magnetfelder von den Widerstandsheizspulen in den Schmelzöfen miterzeugen lassen. Das entsprechende Heizmodul wird dabei nicht mehr mit gewöhnlicher Netzspannung betrieben, sondern mit einer raffinierten Kombination aus Gleich- und Wechselstrom, in deren Konfiguration der Clou des Verfahrens liegt. Zwar wurde es bisher nur im Labor erprobt, doch Modellrechnungen zeigen, dass es auch im industriellen Maßstab einsetzbar ist.

Pressemitteilung des Forschungsverbundes Berlin e. V.

Dieser hochreine Galliumarsenid-Kristall wurde mit Hilfe wandernder Magnetfelder gezüchtet.

INSTITUT FÜR KRISTALLZÜCHTUNG, FVB



OLEG KOCHUKHOV, UNIVERSITÄT UPPSALA

Wabernde Quecksilberschwaden um den Stern Alpha Andromedae

ASTRONOMIE

Widriges Wetter im Weltall

Eine internationale Forschergruppe hat wechselnde dunkle Strukturen auf dem Stern Alpha Andromedae nun als Wolken identifiziert. Sie bestehen allerdings nicht aus Wasserdampf, sondern aus dem giftigen Schwermetall Quecksilber, das sich spektroskopisch nachweisen lässt.

Fünfmal in sieben Jahren untersuchten die Astronomen um Oleg Kochukhov von der Universität Uppsala mit Hilfe von Observatorien in Kanada und Russland das 390 Lichtjahre von der Erde entfernte Himmelsobjekt und stellten dabei fest, dass sich die dunklen Bereiche auf seiner Oberfläche bewegen. Eine Erklärung durch magnetische Kräfte wie beim wechselnden Muster der Sonnenflecken scheidet aus, weil Alpha Andromedae kein oder allenfalls ein sehr schwaches Magnetfeld hat. Wahrscheinlich sorgen, so die Forscher, Diffusionsprozesse für das beobachtete Phänomen.

Der junge Stern, der sich etwa alle 2,4 Tage einmal um sich selbst dreht, hat das giftige Schwermetall aus dem interstellaren Gas aufgesammelt und hält es in seiner Atmosphäre in der Schwebe. Dabei wirken auf die schweren Quecksilberatome zwei gegensätzliche Kräfte: der abstoßende Strahlungsdruck des leuchtenden Sterns und die anziehende Gravitation durch das hohe Gewicht der Metallteilchen. So wabern sie in einer bestimmten Höhe in Form diffuser Gebilde, die ähnlichen dynamischen Selbstorganisationsprozessen unterliegen wie die Wolken auf der Erde oder auf den großen Gasplaneten.

Nature Physics, Online-Vorabpublikation

MEDIZIN

Aids-Virus ausgetrieben

Moderne HIV-Therapien ermöglichen Patienten ein erträgliches Leben mit dem Aids-Erreger. Indem sie die Vermehrung des Virus hemmen, zögern sie allerdings nur den Ausbruch der Krankheit hinaus.

Das Virus aus dem Körper zu verbannen war bisher niemandem gelungen. Als Vertreter der Gruppe der Retroviren kann HIV nämlich sein Genom in das der Wirtszelle einbauen und sich so verstecken. Es lässt dann die Zelle am Leben und wird bei jeder Zellteilung automatisch mit vermehrt. Deshalb ist eine lebenslange medikamentöse Behandlung nötig; schließlich kann das Virus jederzeit wieder aus seinem Versteck ausbrechen.

Nun wecken neue Ergebnisse erstmals die Hoffnung, den Erreger ein für alle Mal aus dem Körper zu vertreiben. Joachim Hauber vom Heinrich-Pette-Institut in Hamburg und seine Kollegen haben es geschafft, aus der DNA einer HIV-infizierten menschlichen Bindegewebszelle das Virusgenom vollständig zu entfernen.

Dabei nutzten sie ein Enzym namens Cre-Rekombinase, das zwei bestimmte Sequenzen im DNA-Doppelstrang erkennt und den dazwischenliegenden Abschnitt herausschneidet. Durch Mutationen veränderten sie das Enzym so, dass es statt der ursprünglichen Sequenzen nun zwei ähnliche Abschnitte erkennt, die das eingebaute Virusgenom flankieren.

Bis zu einem möglichen Einsatz in der HIV-Therapie bleiben allerdings noch etliche Punkte zu klären. So ist völlig offen, wie der Wirkstoff in die Körperzellen des Patienten gelangen könnte und ob er schädliche Nebenwirkungen hat.

Science, Bd. 316, S. 1912

Mitarbeit: S. Hollstein und J. Maier

NASA, JESSE ALLEN / UNIVERSITY OF MARYLAND / WORLD WILDLIFE FUND

Die Wasseradern Amazoniens

Wie ein filigran geädertes Blatt erscheint das Einzugsgebiet des Amazonas auf dieser Karte der Wasserläufe Südamerikas. Grundlage sind hydrografische Daten von HydroSHEDS, einem Projekt des World Wildlife Fund. Diese beruhen ihrerseits auf Vermessungen der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) vom Jahr 2000. Die Farben kodieren Höhen zwischen Meeresniveau (grün) und 4500 Metern (blasslila). Regionen außerhalb des Einzugsgebiets wurden abgedunkelt. Die Karte zeigt auch eine jüngst neu entdeckte Quelle des Amazonas am Nevado Mismi in Südperu (Pfeil). 6800 Flusskilometer von der Mündung entfernt, macht sie den wasserreichsten Strom der Erde auch zum längsten und entthront damit den Nil, der nur eine Strecke von 6695 Kilometern zurücklegt.

ASTRONOMIE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der gewaltigste Sterntod seit Menschengedenken

Mit einem robotischen Teleskop entdeckten Astronomen jüngst die leuchtkräftigste jemals beobachtete Supernova. Sie ist das erste Beispiel eines Typs von Sternexplosionen, wie sie in der Frühzeit des Universums aufgetreten sind.

Von Götz Höppe

Als am 18. September 2006 ein kleines Teleskop auf dem Mount Fowlkes in Texas einen zuvor unbekannten Stern in der Galaxie NGC1260 entdeckte, schien das zunächst nicht besonders aufregend. Das robotergesteuerte Fernrohr war installiert worden, um das sichtbare Nachleuchten so genannter Gammastrahlenausbrüche zu fotografieren – gewaltiger Explosionen in der Tiefe des Alls, die der Nasa-Satellit Swift seit Anfang 2005 dokumentiert. Dessen Alarmbotschaften werden jeweils direkt über das Internet verbreitet; denn schon nach Minuten verlöscht das Licht – wenig Zeit, um seine Quelle zu identifizieren.

Aber nur alle paar Tage macht ein Suchbefehl die Runde. Zwischendurch steht das Teleskop deshalb für andere Forschungsarbeiten zur Verfügung, auch wenn es mit einem Durchmesser von nur 45 Zentimetern nicht größer ist als das vieler Sternfreunde. So fahnden Robert Quimby und seine Kollegen vom McDonald-Observatorium der Universität von Texas damit nach Supernova-Explosionen in nahen Galaxienhaufen. Im Visier haben sie dabei auch den Perseus-Haufen, zu dem die Spiralgalaxie NGC1260 gehört. Mit einer Entfernung von nur 240 Millionen Lichtjahren liegt er nach kosmologischen Maßstäben gewissermaßen vor unserer Haustür.

Von jedem Kandidaten nehmen die texanischen Forscher ein Spektrum auf. Der Befund in diesem Fall: eine Supernova vom Typ II, fortan als SN 2006gy bekannt. Anscheinend hatte der Eisenkern eines massereichen Sterns dem Schweredruck der äußeren Gasschichten nicht länger standgehalten und war kollabiert – eigentlich nichts Besonderes, wie gesagt.

Doch was so unscheinbar begann, sollte sich in den folgenden Monaten zu einer Sensation entwickeln. Während die meisten Supernovae etwa drei Wochen lang heller werden und dann allmählich verblassen, stieg die Leuchtkraft von SN 2006gy über siebzig Tage hinweg immer weiter an. Mehr als hundert Tage lang leuchtete das urplötzlich aufgeflammte Objekt heller als jede bekannte frühere Supernova. Insgesamt strahlte es die hundertfache Energiemenge einer typischen Sternexplosion ab, bei der ein Eisenkern kollabiert. Im Maximum war sie fünfzig Milliarden Mal so hell wie die Sonne und leuchtete zehnmal so stark wie ihre Heimatgalaxie.

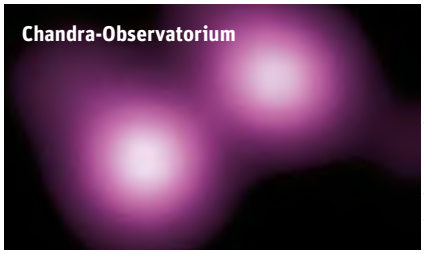
Als sich abzeichnete, wie außergewöhnlich das Ereignis ist, machte sich eine Forschergruppe um Nathan Smith von der Universität von Kalifornien in Berkeley an die Analyse. Was für ein Stern war hier explodiert? Die Theoretiker des Teams versuchten aus den Beobachtungsbefunden die Antwort abzuleiten. War es ein massereicher Riese inmitten einer dichten Gashülle, die er zuvor ausgestoßen hatte? In diesem Fall ließe sich die außergewöhnliche Leuchtkraft auf Stoßwellen der Explosion zurückführen, die sich durch das Gas frästen. Dem widerspricht jedoch, dass der Satellit Chandra nur eine schwache Röntgenstrahlung registrierte. Das deutet auf eine geringe Gasdichte hin. Vor seinem furiosen Finale konnte der Stern also nicht allzu viel Masse verloren haben.

Möglich schien zunächst auch eine andere Vorgeschichte. Dabei hätte ein weißer Zwerg, der einen Überriesenstern auf einer engen Bahn umlief, Materie von dessen ausgedehnter Hülle aufgesogen und wäre explodiert, als er die so genannte Chandrasekhar-Grenze überschritt, die etwa das 1,4-Fache der Sonnenmasse beträgt. Träfe das zu, würde das Licht vom radioaktiven Zerfall des Nuklids Nickel-56 stammen. Dessen Menge müsste jedoch mindestens 22 Sonnenmassen ausmachen, um die Helligkeit von SN 2006gy zu erklären – so viel kann auf diesem Weg nicht entstanden sein.

Dennoch wäre denkbar, dass die Lichtkurve der Supernova auf dem Zer-

Im sichtbaren und infraroten Spektralbereich erstrahlte die Supernova SN 2006gy, wie die Infrarotaufnahme des Lick-Teleskops (links) zeigt, zehnmal so hell wie ihre Heimatgalaxie. In der Röntgenaufnahme des Chandra-Observatoriums (rechts) leuchtet sie dagegen nur etwa gleich stark.

LICK OBS. / UC BERKELEY / J. BLOOM, C. HANSEN



NASA / CXC / UC BERKELEY / N. SMITH ET AL.

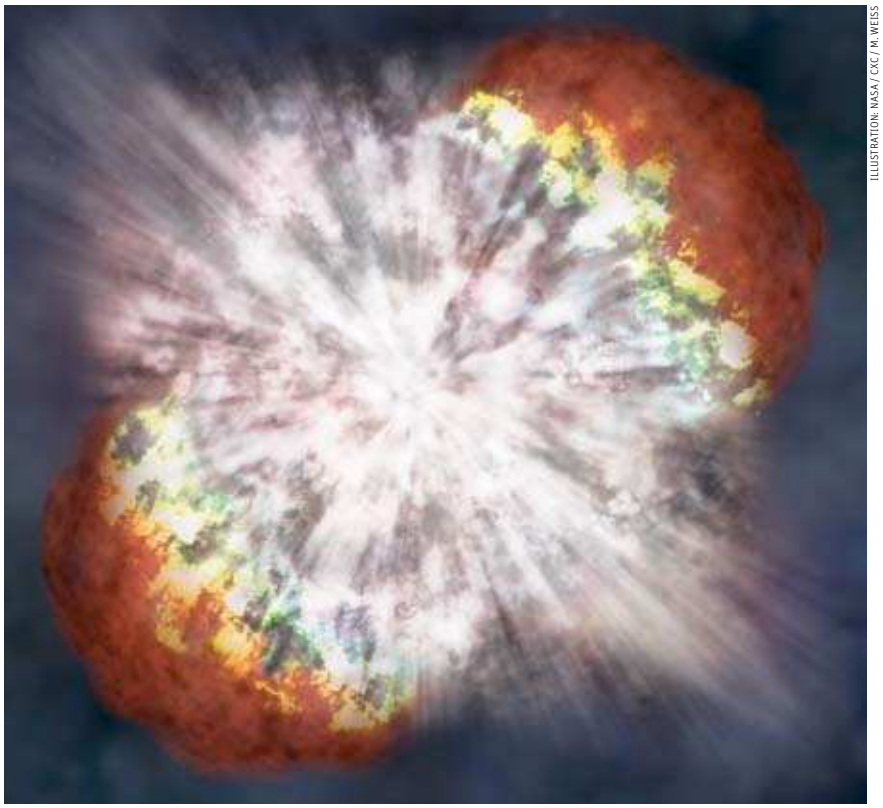


ILLUSTRATION: NASA / CXC / M. WEISS

Bei der Supernova SN 2006gy wurde nach theoretischen Untersuchungen der Vorläuferstern völlig zerfetzt. Zuvor hatte er Wolken aus relativ kühlem Gas ausgestoßen. Die künstlerische Darstellung veranschaulicht, wie die Trümmer der Explosion auf dieses Gas treffen und es in einer Stoßfront aufheizen.

fall von Nickel-56 beruht. Allerdings muss sich dieses Isotop anders gebildet haben. In Frage kommt ein Prozess, der auch die spektroskopischen Beobachtungen recht gut miteinander in Einklang bringt: eine so genannte Paarinstabilität im Eisenkern des Vorläufers.

Wie ein Stern zur Bombe wurde

Das Schicksal der Sterne hängt von einem Gleichgewicht der Kräfte ab. Sie bleiben stabil, wenn der Druck von Gas und Strahlung aus dem Inneren dem Gewicht der äußeren Schichten die Waage hält. Das erfordert zumeist, dass in ihren Zentren Kernfusionsreaktionen ablaufen, die Energie liefern. Die meisten Sterne wandeln zunächst Wasserstoff in Helium um, das sich in ihrem Innern sammelt. Dabei wird nukleare Bindungsenergie frei. In Sternen, die zumindest das Doppelte der Sonnenmasse besitzen, erhitzt sich das Zentrum so stark, dass die Kerne von Helium zu Kohlenstoff verschmelzen, dem Grundstoff weiterer Kernreaktionen.

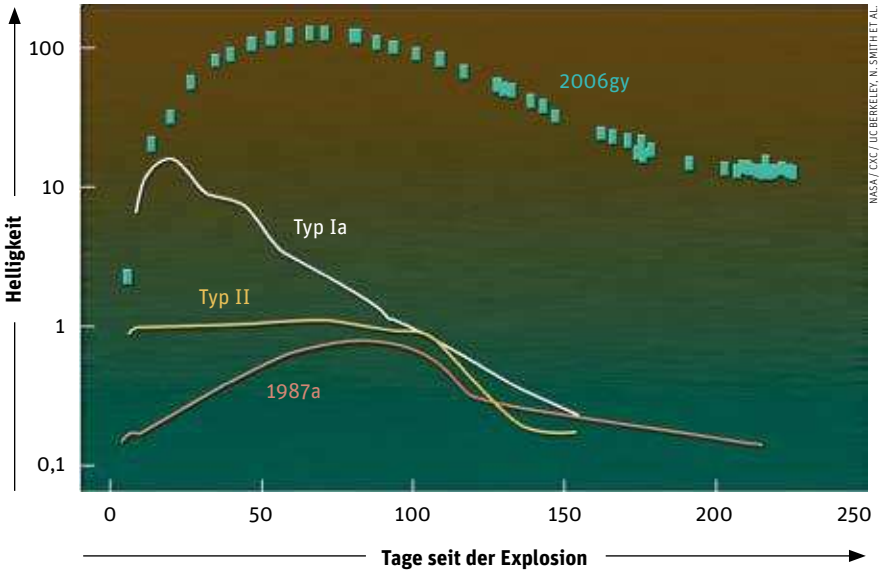
Wie in einer Zwiebel umgeben in Sternen von mehr als etwa zehn Sonnenmassen schließlich – von außen nach innen – Schalen aus Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff, Sauerstoff und Silizium einen Kern aus Eisen. Dieses kann nicht zu noch schwereren Kernen verschmelzen, weil dabei keine Energie mehr frei wird. Was weiter geschieht, hängt vor allem von der Masse des Kerns ab; denn die entscheidet über die Temperatur- und Druckverhältnisse im Zentrum. Während Sterne von bis zu 140 Sonnenmassen zu einem Neutronenstern kollabieren und solche mit mehr als 260 Sonnenmassen zu einem Schwarzen Loch, passiert im Übergangsbereich etwas Besonderes.

Wandelt sich bei der Kernfusion gemäß Einsteins Formel $E = mc^2$ Materie in Energie um, so kann in den Zentren dieser Sterne das Gegenteil passieren: Die bei den Kernreaktionen erzeugte Gammastrahlung bringt Elektron-Positron-Paare hervor, aus Energie wird also Materie. Dadurch lässt der Strahlungsdruck aus dem Inneren schlagartig nach, und das hydrostatische Gleichgewicht bricht zusammen.

Infolgedessen kollabiert der Stern und wird unmittelbar darauf in einer thermonuklearen Explosion zerfetzt. Dabei löst er sich völlig auf; übrig bleibt allein das Auswurfmaterial, das in alle Richtungen davonfliegt. Es ist mit schweren Elementen – Astronomen bezeichnen sie pauschal als Metalle – angereichert, die bei der thermonuklearen Reaktion entstanden sind. Darunter können mehr als 40 Sonnenmassen Nickel-56 sein – genug für eine extrem helle Supernova.

Schon 1964 hatten William A. Fowler vom California Institute of Technology in Pasadena und Fred Hoyle von der Universität Cambridge (England) diesen Prozess theoretisch vorhergesagt. Vier Jahrzehnte später ist SN 2006gy der erste überzeugende Kandidat dafür. Nicht nur seine Helligkeit deutet darauf hin, sondern auch die große Masse des Vorgängersterns, auf welche die spektroskopischen Daten hinweisen. Diese belegen zudem, dass der Stern kurz vor seinem Ende episodisch Masse verloren hat. Darin scheint er einem Objekt in unserer Galaxis zu ähneln, das Astronomen seit Langem fasziniert: Eta Carinae im Sternbild Schiffskiel, dessen dramatische Helligkeitsschwankungen als Vorboten einer Supernova-Explosion gelten.

SN 2006gy ist jedoch nicht nur der gewaltsamste je beobachtete Sterntod: Er verspricht auch neue Einblicke in das frühe Universum. Als Paarinstabilitäts-Supernova können nur Sterne explodieren, die eine sehr große Masse haben und wenig Metalle enthalten. Beides sind Schlüsseleigenschaften, die Astronomen von den ersten Sternen im Kosmos erwarten. Damals gab es nämlich ▷



NASA / CXC / UC BERKELEY, N. SMITH ET AL.

In ihrer Leuchtkraft und -dauer übertraf SN 2006gy die beiden bisher bekannten Supernovatypen sowie ihren berühmten Vorgänger SN 1987a bei Weitem. Vermutlich repräsentiert sie deshalb einen neuen Typ, den Theoretiker schon 1964 vorhergesagt hatten.

▷ praktisch nur die Elemente Wasserstoff und Helium; außerdem können aus metallarmem Gas viel massereichere Sterne hervorgehen als aus metallreichem. Rätselhaft ist, wieso der wesentlich später entstandene Vorgänger von SN 2006gy noch diese Eigenschaften aufwies; eventuell bildete er sich in einer außergewöhnlich metallarmen Gaswolke seiner Heimatgalaxie.

Sollte sich die Paarinstabilität als Zündmechanismus bestätigen, weckt SN 2006gy mit ihrer extremen Leuchtkraft Hoffnungen, solche Explosionen noch in viel größerer Entfernung aufspüren und auf diese Weise in die Frühzeit des Kosmos blicken zu können. Allerdings wird dafür kein Fernrohr von Amateurgröße ausreichen, wie das bei SN 2006gy der Fall war.

Götz Höppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

STAMMZELLFORSCHUNG 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Ersatzorgane aus Bindegewebe?

Durch Genmanipulation ist es bei Mäusen gelungen, Körperzellen in den Embryonalzustand zurückzuversetzen, sodass sich jede Art von Ersatzgewebe daraus züchten lässt. Für Mediziner könnte sich damit ein Traum erfüllen.

Von Gerhard Trageser

Detlef Ganten, Leiter der Berliner Charité, nannte die Neuigkeit im »Spiegel«-Interview sensationell. Ähnlich äußerte sich Hans Schöler vom Max-Planck-Institut für Molekulare Biomedizin in Münster gegenüber der Fachzeitschrift »Nature«. »Es ist unglaublich, einfach fantastisch«, schwärmte er, »für mich ist es wie Dolly, das gleiche Kaliber.«

Der Grund der Begeisterung: Drei Forschergruppen in Japan und den USA konnten jetzt fast gleichzeitig nachweisen, dass sich Bindegewebszellen von erwachsenen Mäusen direkt in pluripotente Stammzellen umwandeln lassen, die sonst nur in ganz jungen Embryonen vorkommen. Dazu schleusten die Wissenschaftler Gene mit der Bauanleitung für vier Transkriptionsfaktoren ein – Steuerelemente, die darüber entscheiden, welche Teile der Erbinformation jeweils genutzt werden. Durch ihre Aktivität bewirkten sie, dass die spezialisierten Fibroblasten alle für sie typischen Festlegungen und Einschränkungen verloren. Sie kehrten quasi in den Zustand eines unbeschriebenen Blatts zurück, in dem sie sich wieder zu jeder Art von Zelltyp entwickeln konnten.

Ethisch unbedenklicher Weg zu embryonalen Stammzellen

Genau aus diesem Grund gelten embryonale Stammzellen, die von Natur aus derart vielseitig sind, als Hoffnungsträger der modernen Medizin: Aus ihnen lassen sich theoretisch je nach Bedarf die verschiedensten Ersatzgewebe oder -organe züchten. Allerdings muss zu ihrer Gewinnung ein sehr früher Embryo zerstört werden, was ethisch problematisch ist – auch wenn dafür überzählige Embryonen aus künstlichen Befruchtungen dienen – und in Deutschland deshalb unter Strafe steht. Sollen die Stammzellen mit dem Empfänger genetisch übereinstimmen, um Gewebeunverträglichkeiten auszuschließen, müssen sie zudem geklont sein – ein weiteres Tabuthema.

Als moralisch einwandfreie Alternative standen bisher ausschließlich adulte Stammzellen zur Verfügung, die zwar auch recht vielseitig sind, aber doch jeweils nur ein beschränktes Spektrum von Gewebetypen hervorbringen können. Die neue Entdeckung ändert das auf einen Schlag. Sie weist einen Weg, wie sich auf ethisch unbedenkliche Weise pluri-

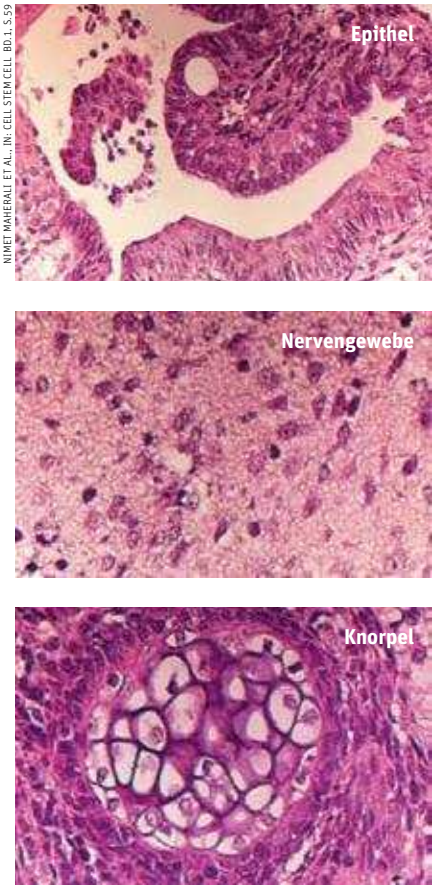
potente Stammzellen erzeugen lassen, die denen aus Embryonen gleichwertig und noch dazu mit dem Empfänger genetisch identisch sind.

Shinya Yamanaka von der Universität Kioto (Japan) hatte das neue Verfahren mit seiner Arbeitsgruppe vor über einem Jahr erstmals erprobt. Damals führte er mit so genannten Retroviren die Gene für die Proteine oct3/4, sox2, c-myc und klf4 in Fibroblasten ein. Von ihnen wusste man, dass sie in dieser Kombination ausschließlich in embryonalen Stammzellen aktiv sind. Yamanakas kühne Hoffnung war, dass durch die erzwungene Präsenz der vier Transkriptionsfaktoren auch das Aktivitätsmuster aller anderen Gene in den embryonalen Urzustand zurückversetzt würde.

Wie bei Genmanipulationen üblich, klappte das Einschleusen der fremden Erbsubstanz allerdings nur bei einem kleinen Teil der behandelten Zellen. Um diejenigen zu isolieren, bei denen das Umprogrammieren funktioniert hatte, verwendete die japanische Gruppe ein charakteristisches Merkmal an der Oberfläche embryonaler Stammzellen als Selektionskriterium. Wie sich nachträglich herausstellte, trafen sie dabei eine unglückliche Wahl. Der ausgesuchte Marker eignete sich nicht sehr gut zur Unterscheidung zwischen den reprogrammierten Zellen und den vielen anderen.

Das führte zu teils widersprüchlichen Ergebnissen. In den meisten Tests erwiesen sich die Zellen zwar als pluripotent, in einem entscheidenden jedoch nicht: Wurden sie in sehr frühe Embryonen – so genannte Keimbläschen oder Blastozysten – injiziert, bauten sie sich nicht wie echte embryonale Stammzellen so stabil in den wachsenden Organismus ein, dass ein lebensfähiges »Mosaiktier« entstand. Deshalb blieben damals Zweifel am Erfolg des Verfahrens.

Diese haben nun sowohl Yamanaka als auch zwei andere unabhängige Forschungsgruppen ausgeräumt. Alle drei Teams, darunter eines um Rudolf Jaenisch vom Whitehead-Institut für ▷



NIMET MAHERALI ET AL., IN: CELL STEM CELL, BD. 1, S. 59

Ein Beleg für die Pluripotenz der aus Bindegewebe erzeugten Stammzellen ist ihre Fähigkeit, Geschwulste zu bilden, in denen die verschiedensten Gewebetypen vorkommen: Epithel, Nerven und Knorpel.

ANZEIGE

Konzentrierter.
Belastbarer.
Ausgeglichener.

Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.
Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – mit Tebonin®.

Tebonin®
Mehr Energie für das Gehirn.
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761®
- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

Mit der Natur.
Für die Menschen.
Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.tebonin.de

Tebonin® intens 120 mg Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (dementielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Hinweise: Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.** Stand: Juli 2007 T/07/07/1

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

6. Auf dieser Seite und unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743
per Fax: 06221 9126-751
per E-Mail: service@spektrum.com
oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

Wenn Sie Spektrum der Wissenschaft selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Was macht das Licht wenn's dunkel ist?«
Hier beantworten Experten Fragen, die wir schon immer einmal stellen wollten.

Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Fahrradkorb von Reisenthel:
Die rasant-mobile Variante des Einkaufskorbs mit Deckellatz, Handy-stecktasche und Universalhalterung für alle gängigen Lenkerbügel, Maße: 35 x 25 x 26 cm

Produkt des Monats

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

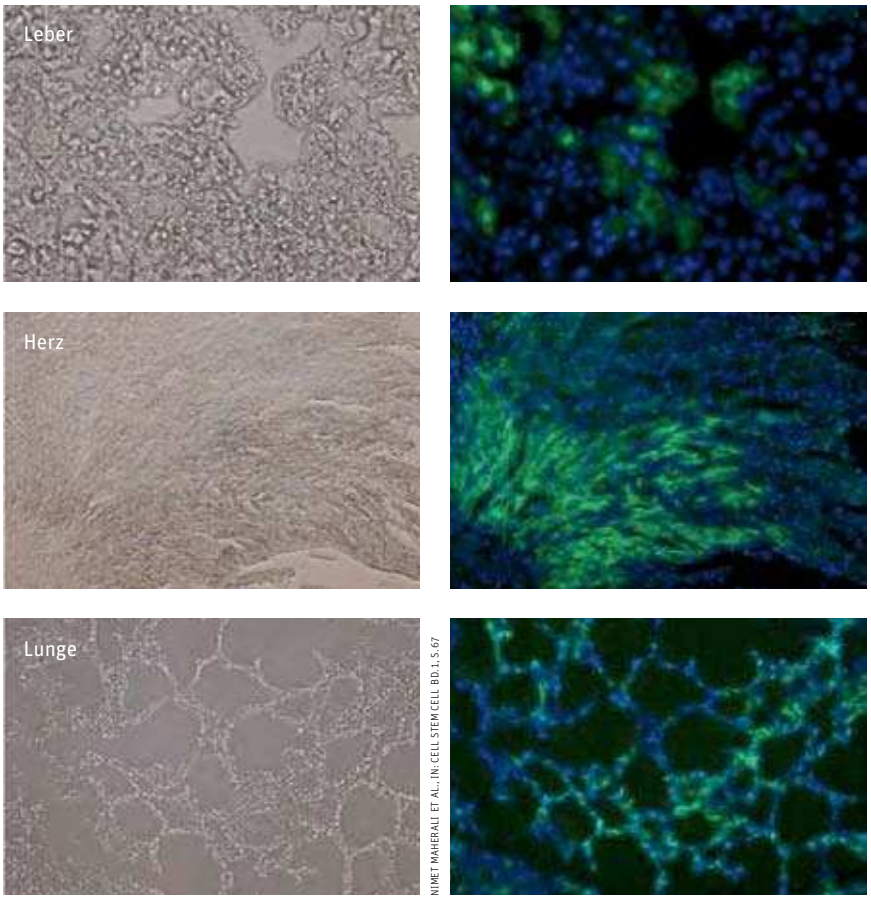
▷ Biomedizinische Forschung und die Arbeitsgruppe von Konrad Hochedlinger am Harvard Stem Cell Institute in Cambridge (Massachusetts), verwendeten zwei andere Marker zur Selektion der umprogrammierten Zellen.

Daraufhin gingen alle Tests auf die Pluripotenz positiv aus. So bildeten sich aus den Zelllinien bei geeigneter Behandlung so genannte Embryoidkörper und Geschwulste (Teratome) mit den verschiedensten Zelltypen. Die Forscher verglichen außerdem Merkmale der Erbsubstanz selbst wie das Genaktivitäts- und DNA-Methylierungsmuster sowie den Verpackungsgrad des Erbguts als Chromatin. Auch dabei zeigten sich große Ähnlichkeiten. Ein besonders auffälliges Zeichen für die Rückkehr in den Urzustand war, dass bei Fibroblasten aus Weibchen das dort inaktivierte zweite X-Chromosom wieder angeschaltet wurde.

Schließlich gelang es diesmal problemlos, durch Injektion der induzierten pluripotenten Stammzellen in Blastozysten Mäuse heranzuzüchten, bei denen in sämtlichen Geweben Zellen mit dem Erbgut der ehemaligen Fibroblasten vorkamen. Diese Chimären gaben die Stammzell-DNA auch an ihre Nachkommen weiter. Jaenisch gelang es mit einem Trick sogar, einen embryonalen Klon des Spendertiers zu erzeugen.

Im Jubel über den neuen Durchbruch ging freilich unter, dass es Wissenschaftler um Gerd Hasenfuß und Wolfgang Engel von der Universität Göttingen schon vor einem Jahr geschafft hatten, embryonale Stammzellen aus Gewebe erwachsener Mäuse zu gewinnen. Sie benutzten dafür unreife Spermatogonien, also Vorläufer der Spermien. Ein Gentransfer war in diesem Fall nicht nötig, ein geeignet zusammengesetztes Kul- ▷

Wurden die aus Bindegewebe erzeugten pluripotenten Stammzellen in sehr frühe Embryonen injiziert, integrierten sie sich und kamen in dem resultierenden »Mosaiktier« in praktisch jedem Organ oder Gewebetyp vor. Den Beweis lieferten Markergene für das grün fluoreszierende Protein (GFP), die auf die Stammzellen übertragen worden waren. Sie lassen die Strukturen »fremden« Ursprungs grün leuchten, während die eigenen durch Anfärben mit einer Substanz namens DAPI violett erscheinen.



NIMET MAHERALI ET AL.: IN: CELL STEM CELL 1(1), S. 67

WISSEN
WAS HEUTE WICHTIG IST

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/heute

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

MARIUS WERNIG ET AL., NATURE (DOI: 10.1038/NATURE05944), FIG. 5A

Statt mit GFP wurden induzierte pluripotente Stammzellen auch mit dem Gen für die Haarfärbung der Agutis markiert. Die resultierenden Mosaiktiere wiesen entsprechend ein gescheckes Fell auf.

turmedium genügte. Das ist ein Vorteil gegenüber der neuen Methode. Dem steht allerdings ein gravierender Nachteil gegenüber: Spermatogonien lassen sich viel schwieriger gewinnen als Bindegewebszellen und kommen ausschließlich in männlichen Tieren vor.

Bei aller Freude über die an Mäusen erzielten Erfolge bleibt außerdem festzuhalten, dass sie nur medizinisch verwertbar sind, wenn sie sich auf den Menschen übertragen lassen. Das aber steht keineswegs fest. Die Erfahrungen mit dem Klonen stimmen eher skeptisch. Bisher ist die Prozedur zwar bei zahlreichen Säugetieren – darunter Mäusen – gelungen, aber noch nicht beim Menschen.

Zudem arbeitet die Göttinger Gruppe seit einem Jahr vergeblich daran, pluripotente Stammzellen aus menschlichen Spermatogonien zu gewinnen. Als Haupthandikap erwies sich nach ihrer Aussage der Mangel an Ausgangsmaterial, das wegen der prekären Prozedur einer Hodenbiopsie nicht von menschlichen Spendern erhältlich ist und bisher nur aus Krebsgewebe entnommen werden konnte.

Selbst wenn das Zurückversetzen des genetischen Programms von Fibroblasten in den embryonalen Ausgangszustand auch beim Menschen gelingt, bleibt ein kritischer Punkt: Das Verfahren erfordert eine drastische Genmanipulation, die auf große Vorbehalte stoßen dürfte. Im vorliegenden Fall wäre sie sogar unvertretbar. Nicht nur die zum Einschleusen verwendeten Retroviren bergen ein Tumorrisiko, auch zwei der vier übertragenen Gene für Transkriptionsfaktoren gehören zu einem Typ, der bei Mutation oder übermäßiger Aktivierung Krebs auslösen kann. Dass diese Gefahr real ist, zeigen die jetzt veröffentlichten Versuche. Immerhin ein Fünftel der Mosaiktiere von Yamanaka entwickelte Krebs. Die Wissenschaftler hoffen, Möglichkeiten zu finden, diese nicht tolerierbaren Nebeneffekte zu umgehen.

Stammzellforscher in Deutschland zeigen sich derweil verbittert, dass sie bei dem nun einsetzenden Wettlauf um die Übertragung der Ergebnisse auf den Menschen ausgeschlossen bleiben. Um zu beweisen, dass reprogrammierte pluripotente Stammzellen mit embryonalen identisch sind, bräuchten sie Zugang zu neueren solchen Zelllinien vom Menschen. Heftiger denn je fordern sie deshalb eine Änderung des rigiden deutschen Embryonenschutzgesetzes. Doch selbst wenn sie die Politiker überzeugen könnten, käme die Lockerung vermutlich zu spät. Bis dahin dürfte die Entdeckung im Ausland gelungen sein.

Gerhard Trageser ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

VERHALTENSFORSCHUNG Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Die Nussknacker von Noulo

Schon vor 4300 Jahren öffneten Schimpansen Nüsse mit Steinwerkzeugen, wie Grabungen in Westafrika zeigen. Sind gewisse Kulturtechniken ein gemeinsames stammesgeschichtliches Erbe von Affen und Menschen?

Von Lars Fischer

Im Jahr 2003 machten Archäologen in den Sandschichten eines prähistorischen Flussufers eine bemerkenswerte Entdeckung. In 60 bis 90 Zentimeter Tiefe stießen sie auf eine Ansammlung von mehr als 200 Gesteinen oder Gesteinsfragmenten mit deutlichen Gebrauchs- und Bearbeitungsspuren. Offenbar handelte sich um jahrtausendealte Werkzeuge. Das Besondere: Ein Großteil davon stammt nicht von Menschenhand.

An der Grabung unter Leitung von Julio Mercader Florin von der Universität Calgary waren auch Schimpansenforscher um Christophe Boesch vom Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie beteiligt. Der Fundort liegt im Taï-Nationalpark im Westen der Republik Elfenbeinküste. Dort, in einem der letzten intakten tropischen Regenwälder Westafrikas, sind seit Jahrtausenden Schimpansen heimisch.

Entdeckt wurde der prähistorische »Arbeitsplatz« in der Schwemmebene des Flusses Audenisrou, wo sich im Verlauf der letzten 6000 Jahre eine über vier Meter dicke Sedimentschicht abgelagert hat. Nach Radiokarbondatierungen an organischem Material aus der gleichen Tiefe wie die Gesteine stammen die ältesten Fundstücke aus der späten Steinzeit vor rund 4300 Jahren.

Etwa die Hälfte der Artefakte ist zwar menschlichen Ursprungs. Es handelt sich um Gesteinssplitter, die auf gezielte Abschläge zurückzuführen sind – ein Verfahren, mit dem unsere Vorfahren Steingeräte wie Klingen oder Speerspitzen herstellten. Über diese Fertigkeit verfügten nur die Echten Menschen (Homininen), die sich vor ungefähr fünf Millionen Jahren von den Vorfahren der Schimpansen trennten.

Dennoch handelt es sich bei der Fundstelle nicht um eine ehemalige menschliche Siedlung. Typische Anzei-

DIESE SCHULEN SUCHEN EINEN SPONSOR!

wis
wissenschaft in die schulen!

Wir wollen das Interesse von Jugendlichen an Naturwissenschaften und Technik wecken und fördern. Hierfür benötigen wir Sponsoren für unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!«. Wir, das sind der Verlag **Spektrum der Wissenschaft** und als Schirmherren die **Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie** sowie das **Max-Planck-Institut für Astronomie**.

Dazu brauchen wir Ihre Hilfe, denn schon jetzt wollen weit über 7000 Schüler an »Wissenschaft in die Schulen!« teilnehmen, unter anderem an folgenden Gymnasien:

SPONSOR GESUCHT!

Samuel-von-Pufendorf-Gymnasium, 09557 Flöha
John-Lennon-Gymnasium, 10119 Berlin
Kaiserin-Auguste-Viktoria-Gymnasium, 29221 Celle
Liebigschule, 35390 Gießen
Gymnasium Oesede, 49124 Georgsmarienhütte
Staatliches Eifel-Gymnasium, 54673 Neuerburg
Johann-Sebastian-Bach-Gymnasium, 68199 Mannheim
Thomas-Mann-Gymnasium, 76297 Stutensee
Rupprecht-Gymnasium, 80636 München
Johann-Schöner-Gymnasium, 97753 Karlstadt

Möchten auch Sie WiS unterstützen und als Sponsor auftreten?
Alle weiteren Informationen finden Sie unter

WWW.WISSENSCHAFT-SCHULEN.DE/SPONSOR

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

Schimpansen im Taï-Nationalpark im Westen der Republik Elfenbeinküste knacken Pandanüsse mit speziellen Hammersteinen – hier ein typisches Exemplar mit deutlichen Abnutzungsspuren.

chen dafür wie die Überreste von Feuerstellen und Behausungen sowie verkohlte Rückstände von Nahrungsmitteln fehlen in Noulo gänzlich. Das Gelände, ein gelegentlich überschwemmtes Flussufer, taugte dafür wohl auch schlecht.

Die am Projekt beteiligten Anthropologen vermuten deshalb, dass steinzeitliche Menschen den Ort nur gelegentlich aufsuchten, um zur Werkzeugherstellung geeignete Steine zu suchen. Die gefundenen Splitter stammen demnach von Testabschlägen an viel versprechend aussehenden Brocken. Darauf deutet auch ihre verhältnismäßig geringe Zahl hin.

Die übrigen Funde aber sind unbearbeitete Steine, die zufällig eine hammerähnliche Form haben. Sie dienten, wie Abnutzungsspuren zeigen, zum Aufbrechen von Nüssen oder anderen hartschaligen Nahrungsmitteln – eine bei Menschen und Schimpansen gleichermaßen gängige Praxis. In Noulo wurde sie allerdings nur von den Affen geübt. Das konnten die Forscher durch genaue Untersuchungen zeigen. Dabei machten sie sich zu Nutze, dass Menschen und Schimpansen sehr unterschiedliche Steine als Hammer verwenden und jeweils andere Nahrungsmittel damit aufbrechen.

Die Menschenaffen haben wesentlich größere Hände und sind erheblich kräftiger als unsereins. Durch Beobachtungen heutiger Schimpansen weiß man, dass sie bevorzugt zwischen einem und neun Kilogramm schwere Steinhämmer zum Knacken stärkehaltiger Nüsse benutzen. Entsprechende Werkzeuge unserer Vorfahren wogen dagegen selten mehr als 400 Gramm. Die Hammersteine von Noulo sind deutlich schwerer: Ihr durchschnittliches Gewicht liegt bei etwa zwei Kilogramm.

Hinzu kommt, dass der *Homo sapiens* andere Gesteinstypen bevorzugte als die Menschenaffen. Er wählte gewöhnlich besonders harte Materialien wie Quarzit oder Quarz, die beim Abschlagen schmale Klingen mit scharfen Kanten liefern. Schimpansen dagegen zeigen eine Vorliebe für Granite und ähnliche schwere Gesteine. Diese stellen in der Tat den überwiegenden Anteil der Fundstücke von Noulo.

Uralte Schimpansen-Werkstatt

Wenn Nüsse mit einem Stein zertrümmert werden, bleiben gewöhnlich Rückstände von Pflanzenmaterial an dem Werkzeug zurück. Derartige Überreste hafteten auch in den Vertiefungen zahlreicher Gesteinsbrocken in Noulo, darunter viele Stärkekörner. Diese so genannten Granula haben eine für die jeweilige Pflanze spezifische Form. Deswegen ließen sich sogar die Fruchtarten bestimmen, die einst mit den Hammersteinen zerschlagen wurden.

Die heute im Taï-Nationalpark lebenden Schimpansen knacken auf diese Weise fünf verschiedene Sorten stärkehaltiger Nüsse. Genau von dieser Auswahl stammt der überwiegende Teil der Pflanzenrückstände, welche die Forscher an den Hammersteinen von Noulo nachwiesen. Nur eine der fünf Nussarten wird auch von Menschen verzehrt.

Demnach kann als sicher gelten, dass es Schimpansen waren, die einen Großteil der gefundenen Werkzeuge dort hinterließen. Erstmals gelang es somit, ein intelligentes, kulturell tradiertes Verhalten von Menschenaffen lange vor unserer Zeit nachzuweisen. Bisher wurde oft vermutet, dass die Benutzung von Werkzeugen bei Schimpansen evolutionär gesehen sehr jung ist und vielleicht sogar auf die direkte Imitation des Verhaltens moderner Menschen zurückgeht. Die neuesten Ausgrabungen in Westafrika widersprechen dem jedoch. Damals war die menschliche Besiedlungsdichte in der Region noch sehr gering und es gab keine Landwirtschaft. Deshalb dürften die Schimpansen kaum Gelegenheit gehabt haben, das Verhalten, das sie selbst mühsam ihrem Nachwuchs beibringen, dem Menschen abzuschauen.

Das Forscherteam interpretiert seine Ergebnisse folglich als Hinweis darauf, dass die Tendenz zum Einsatz technischer Hilfsmittel ein gemeinsames stammesgeschichtliches Erbe von Mensch und Schimpanse darstellt. Die westafrikanischen Schimpansen benutzen insgesamt dreißig verschiedene Werkzeuge für diverse Zwecke – vom Kratzen über das Fangen von Insekten bis zum Sammeln von Honig. Wahrscheinlich gibt es bei all diesen Verhaltensweisen eine weit in die Vergangenheit zurückreichende Tradition.

Auch das Nüsseknacken beschränkt sich ja nicht darauf, dass die Tiere eine zufällig gefundene Frucht mit einem Stein aufbrechen, den sie gerade zur Hand haben. Wie heutige Beobachtungen und die jüngsten Ausgrabungen belegen, wählen die Schimpansen vielmehr geeignete Rohmaterialien gezielt aus und bringen sie an einen günstigen Ort, dessen Ressourcen sie nutzen und zu dem sie regelmäßig zurückkehren.

All das sind Merkmale einer materiellen Kultur, wie sie bisher als für unsere Spezies typisch galten. Offenbar aber reichen sie weit in die evolutionäre Vergangenheit von Mensch und Schimpanse zurück – möglicherweise bis zum letzten gemeinsamen Vorfahren der beiden.

Lars Fischer ist freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Der Charme einfacher Weltbilder

Wie Kinder von der Intuition zur Wissenschaft finden – oder nicht

Aufgeregt lief der Junge in die Küche und schrie mit erhobenem Zeigefinger: »Neun Komma einundachtzig Meter pro Sekundenquadrat!« Die Mutter sah zerstreut vom Herd auf und über die Schulter zurück zu dem eigentümlichen Knaben, der ich damals war. Seit ich mir das Taschenbuch »Einstein und das Universum« zu Weihnachten gewünscht hatte, wunderte meine Eltern gar nichts mehr.

Die Erdbeschleunigung hatte ich soeben in meinem neuen Geburtstagsgeschenk gefunden: »Physik für alle« von Werner Braunbek. Von der Formel $g = 9{,}81\ m/sec^2$ war ich ungeheuer begeistert, galt sie doch, mächtiger als jedes Zauberwort, ausnahmslos für alle Dinge im grenzenlosen Bereich der Erdanziehung. Der universelle Anspruch der Physik – »für alle!« – machte mich ganz schwindlig. Ich lief ins Wohnzimmer, legte mich flach auf den Teppich und starrte so lange zur Deckenlampe, bis die Welt kopfstand und ich förmlich sah, wie die Schwerkraft den Lampendraht von der Decke unten zu mir aufwärtsspannte.

Warum konnte mich der Formelfund so faszinieren? Psychologischen Erkenntnissen zufolge kommen wir nicht als Newtonianer auf die Welt, sondern als Aristoteliker. Wie der alte Grieche und seine mittelalterlichen Schüler sind Kinder intuitive Anhänger der Impetus-Theorie: Die Dinge streben vermeintlich aus innerem Antrieb nach unten, und ein im Kreis herumgewirbelter Gegenstand fliegt losgelassen auf gekrümmter Bahn davon. Darum waren Galileis Trägheitsprinzip und Newtons Kraftgesetz für die Zeitgenossen wohl kaum weniger kontraintuitiv als für uns heute die Quantenmechanik.

Auf Widersprüche zwischen Intuition und Wissenschaft reagieren Menschen nicht immer so positiv überrascht und neugierig. Ich sog als Heranwachsender alle Offenbarungen der populären Physikbücher gierig auf, denn sie wurden, soweit sie nicht – wie bei meiner Mutter – einfach auf freundliches Desinteresse stießen, von Jung und Alt problemlos anerkannt. Niemand kam auf die Idee, mir die Newton'sche Physik auszureden.

Doch wissenschaftliche Erkenntnisse werden viel schwerer akzeptiert, wenn sie nicht die unbelebte Natur, sondern uns nahegehende Lebensphänomene kontraintuitiv erklären. Kinder sind nicht nur naive Physiker, sondern auch intuitive Biologen und Psychologen. Von Lebewesen nehmen sie von Haus aus an, diese seien – ganz ähnlich wie Stofftiere – absichtlich und zu dem Zweck erschaffen, im Zoo besucht und wenn möglich gestreichelt zu werden. Zu diesem spontanen Kreationismus gesellt sich ein intuitiver Leib-Seele-Dualismus: Vorschulkinder wissen zwar in der Regel, dass das Gehirn etwas mit Denken zu tun hat, meinen aber, für Gefühle, Fantasien und Aktionen sei nicht der Kopf zuständig, sondern irgendetwas anderes, Unsichtbares.

Aus solchen entwicklungspsychologischen Befunden folgern Paul Bloom und Deena Skolnick Weisberg von der Harvard-Universität, dass Kreationismus und Dualismus einem quasi naturwüchsigen Hang entspringen – und sich zur antiwissenschaftlichen Weltanschauung auswachsen können, wenn eine sozial anerkannte, insbesondere religiöse Autorität massiv dafür eintritt *(Science, Bd. 316, S. 996)*.

Das bringt mich auf den Gedanken, wie es mir wohl ergangen wäre, wenn ich meine physikalischen Weisheiten über die Wunderwelt der Gravitation nicht in einer Küche des 20. Jahrhunderts ausposaunt hätte, sondern etwa – per Zeitmaschine in die Vergangenheit zurückversetzt – in einem römischen Priesterseminar der Renaissance. Ein keckes »Eppur si muove« (Und sie bewegt sich doch) wäre mich da vielleicht teuer zu stehen gekommen. Doch mit dem Spruch »Kindermund tut Wahrheit kund« hätte ich mich französisch empfohlen.

Michael Springer

NEnA
nano-entrepreneurship-academy

32 Wissenschaftlerinnen mit Unternehmerinnengeist gesucht!

Im Fokus:
Nano als Zukunftsmarkt

Einwöchige Nano-Entrepreneurship-Akademie, die zeigt, was in Ihnen steckt und wie Sie eigene Ideen zu Kapital machen können.

Denn unternehmerisches Denken und Handeln ist eines der wesentlichsten Elemente für Ihren weiteren Erfolg.

30.9. – 5.10.2007
NEnA I in Paderborn

Anmeldeschluss: 15. August 2007

Anmeldung und weitere Informationen unter:
www.nano4women.com

Teilnahmegebühr all-inklusive: 199 Euro.
Stipendien möglich.

Übrigens: Das beste Gründerinnenkonzept wird mit einem mehrmonatigen Business-Aufenthalt in den USA prämiert!

NEnA ist als neue Initiative von nano4women Teil des Aktionsprogramms „Power für Gründerinnen" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Die jeweils einwöchigen Nano-Entrepreneurship-Academies schlagen unter der Federführung der Universität Halle/Saale in Zusammenarbeit mit Uniconsult – Technologietransfer der Universität Paderborn, dem Zentrum für Weiterbildung und der science-2 public – Gesellschaft für Wissenschaftskommunikation sowie einem starken bundesweit wie regional aktiven Netzwerk aus über 80 Partnern die Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft.

Spektrum der Wissenschaft
ist Medienpartner dieser Initiative

RAÚL MARTIN

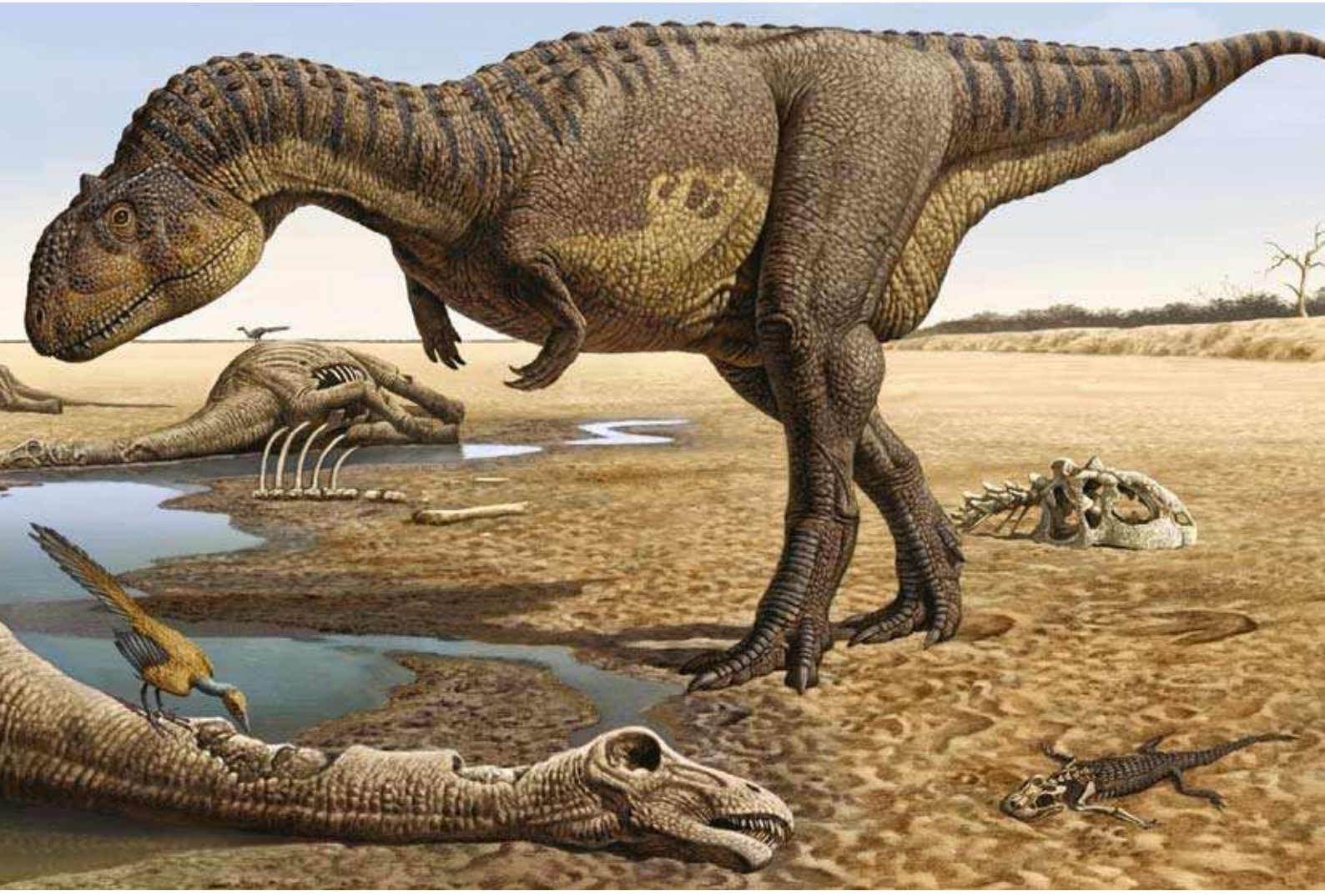
Saurier-Massengrab auf Madagaskar

Mehrere Millionen Jahre vor dem Ende der Dinosaurier bildete sich aus ihren Knochen ein gewaltiges Lager auf der viertgrößten Insel der Erde. Paläontologen enthüllen dessen Geschichte.

Von Raymond R. Rogers
und David W. Krause

Ein Skelett liegt auf der linken Seite, den Kopf weit nach hinten gebogen, eine typische Todeshaltung. Arme und Beine sitzen noch anatomisch korrekt. Genaueres Hinsehen zeigt: Auch die Knochen von Händen und Füßen sind fast vollständig vorhanden, wenn auch teilweise verschoben. Der Schädel besteht ebenfalls aus mehreren getrennten Teilen. Zusammengehörige Stücke liegen aber noch beieinander. Merkwürdigerweise fehlt die Schwanzspitze.

Nahebei finden sich mehr Skelette. Auffälligerweise sind sie unterschiedlich komplett und die Knochen zudem mal mehr, mal weniger gut erhalten. Bei einigen Skeletten fehlen kaum Teile, bei manchen liegen die Knochen sogar noch in ziemlich korrekter Position. Andere Funde sind weniger vollständig. Teils existiert nur noch der Schädel oder ein Schulterblatt oder ein einzelner Beinknochen.



Auf Madagaskar starben Dinosaurier bei anhaltender Dürre oft an Wasserlöchern. Vorn liegt ein Elefantenfußdinosaurier der Gattung *Rapetosaurus*. An ihm frisst ein *Majungatholus*. Dieser Raubsaurier verzehrte auch Artgenossen (hinten links). Das Fossillager enthielt zudem Knochen von frühen Vögeln, hier die Gattung *Rahonavis*.

Warum wirken diese Knochenreste so verschiedenartig – warum bietet die Szenerie ein solches Durcheinander? Verendeten all diese Tiere am Fundort? Oder kamen ihre Überreste erst später dorthin? Starben sie überhaupt zur gleichen Zeit? Vor allem: Warum ließen sie hier so zahlreich ihr Leben?

Unser Team – madagassische und amerikanische Paläontologen und Geologen – entdeckten das Massengrab im Sommer 2005 im Nordwesten Madagaskars. Wie üblich, gaben wir dem Fundort zuerst eine Bezeichnung: MAD 05-42, was die Insel, das Fundjahr und die laufende Nummer von Fossilfundstätten in dem Gebiet benennt. Anschließend identifizierten wir die Skelette und Knochenreste. Da wir in der Gegend schon länger paläontologisch arbeiteten, konnten wir die einzelnen Tierarten bald bestimmen. Überwiegend handelte es sich um Relikte verschiedener Dinosaurier.

Faszinierenderweise ist dies nicht das einzige Massengrab dieser Art, auf das wir in Nordwestmadagaskar stießen. Während der mittlerweile gut zehn Jahre, in denen wir in der halbtrockenen Grassteppe in der Umgebung des Dorfs Berivotra geologische Studien durchführen, begegnete uns wiederholt Ähnliches. Nicht selten fanden wir sogar mehrere Massengräber in übereinanderliegenden Schichten, jede voller Dinosaurierfossilien, und jedes Lager ein Sammelsurium von großen wie kleinen Arten, von jungen und alten Tieren. Rätselhaft war allerdings, wie diese Ansammlungen entstanden sind. Warum gab es gerade hier so viele davon, und wieso hatten sich die Knochen und Skelette häufig so gut erhalten?

Die Antworten steckten im Gestein. Um sie zu finden, mussten wir die Ablagerungen datieren, also geologische Methoden anwenden, und wir mussten die Begleitumstände des Sterbens sowie der Einbettung, Fossilisation und Lagerung erforschen, das heißt taphonomische Studien durchführen.

Nur in unseren Labors in den USA war es möglich, die fossilen Knochen eingehend genug zu untersuchen. Folglich mussten wir die gebrechlichen Gebilde aus dem umgebenden Gestein heraushauen und dann zum Transport herrichten. Die über den Fossilien liegenden Sedimente konnten wir zunächst mit Schaufeln und speziellen Geologenhäm- ▷

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: RAYMOND R. ROGERS

▷ mern entfernen. Danach griffen wir zu Zahnarztbesteck und feinen Pinseln, denn die Oberfläche der Knochen war hochempfindlich und durfte nicht beschädigt werden. Jedes freigelegte Teil kartierten und fotografierten wir. Auch die Lagebeziehungen der Einzelstücke zueinander hielten wir genau fest. Als Nächstes tränkten wir die Knochen mit einem stabilisierenden Leim. Dann umhüllten wir sie noch sorgfältig mit Sackleinen und Gips – was sich später gut wieder entfernen lässt. Nachdem dieser Schutzmantel ausgehärtet war, nummerierten und katalogisierten wir die Fossilien. Nun endlich konnten wir sie für die lange Reise verpacken. Erst in unseren Labors würden wir vorsichtig die letzten anhaftenden Sedimentreste abkratzen und die Knochen akribisch auf Besonderheiten hin prüfen, vor allem auf Anzeichen von Todesursachen.

Wie alt ist das Dinosaurier-Massengrab? Bereits am Fundort erkannten wir, dass es in einer Schicht liegt, die bei den Fachleuten Maevarano-Formation heißt. Jene Formation erstreckt sich ein paar Dutzend Meter unterhalb der so genannten Kreide-Tertiär-Grenze: dem markanten Schnitt vor rund 65 Millionen Jahren, als nicht nur fast alle Dinosaurier (nur nicht die Vögel), sondern auch viele andere Organismen ausstarben. Unser Fossillager befand sich 44,5 Meter unter dem Horizont aus der Zeit jenes Massenaussterbens, war somit deutlich älter.

Desaster lange vor der globalen Katastrophe

Es lag zudem 14,5 Meter tiefer als die lokale Obergrenze der Maevarano-Formation. Die Schichten vulkanischen Gesteins unmittelbar unterhalb dieser Formation bildeten sich Radioaktivitätsmessungen zufolge vor etwa 88 Millionen Jahren. Direkt über der Formation, teils auch in sie eingebettet, konnten wir Meeresablagerungen bestimmen, die von den Gezeiten an der Westküste der Insel stammen. Diese Sedimente enthalten Schalen von Meeresmuscheln und anderen Weichtieren sowie Skelette von einzelligen Mikroorganismen, deren Alter Forscher andernorts ermitteln konnten. Jene Arten lebten gegen Ende der Kreidezeit, allerdings nicht unmittelbar davor. Nach diesen Informationen dürfte das Massengrab MAD 05-42 ungefähr 70 Millionen Jahre alt sein. Somit star-

In Kürze

▶ Magagaskar beherbergt **reiche Fossilstätten von Dinosauriern** aus der späten Kreidezeit. Sie zeugen von einer Reihe tödlicher Katastrophen – Millionen Jahre vor dem Untergang dieser im Erdmittelalter ökologisch so erfolgreichen Echsen.

▶ Wiederholt verendeten am selben Ort viele Tiere, verteilt über Wochen oder Monate. Sie starben in **Dürrezeiten** an den letzten Wasserstellen. Später begruben **Schlammfluten** der nächsten Regenzeit die herumliegenden Kadaver, die dann fossilisierten.

Das Massengrab MAD 05-42 liegt in Nordwestmadagaskar (ganz links). Unter anderem enthält es Fossilien von dem Fleisch fressenden Theropoden *Majungatholus atopus* (Mitte). Im Bild rechts unten einer seiner Unterkiefer. Bevor die Fossilien zu genaueren Studien in die USA gebracht wurden, mussten sie eingegipst und sorgsam verpackt werden (oben rechts).

ben diese Tiere mehrere Millionen Jahre, bevor die großen Dinosaurier von der Erde verschwanden, und aus anderen Gründen. Mit der Katastrophe am Ende der Kreidezeit hatte dieser Friedhof offensichtlich nichts zu tun.

Weitere Erkenntnisse brachten die taphonomischen Studien – die ermitteln, was während des Todes und danach geschieht. In dieses Forschungsfeld gehören verschiedenste Veränderungen an den Knochen, etwa Biss- und Brandspuren oder Knochenbrüche. Thaphonomen interessiert auch, ob ein Kadaver oder Skelett nachträglich noch von Tieren verschleppt oder auf andere Weise verlagert wurde, und ob Raubtiere oder Aasfresser zunächst einzelne Teile wegbrachten. Des Weiteren ergründen sie, wie lange die Knochen noch frei lagen, wann und wie die Überreste eingebettet wurden und was ihnen später widerfuhr. Hierunter fällt auch die Fossilisation, der Prozess der Versteinerung.

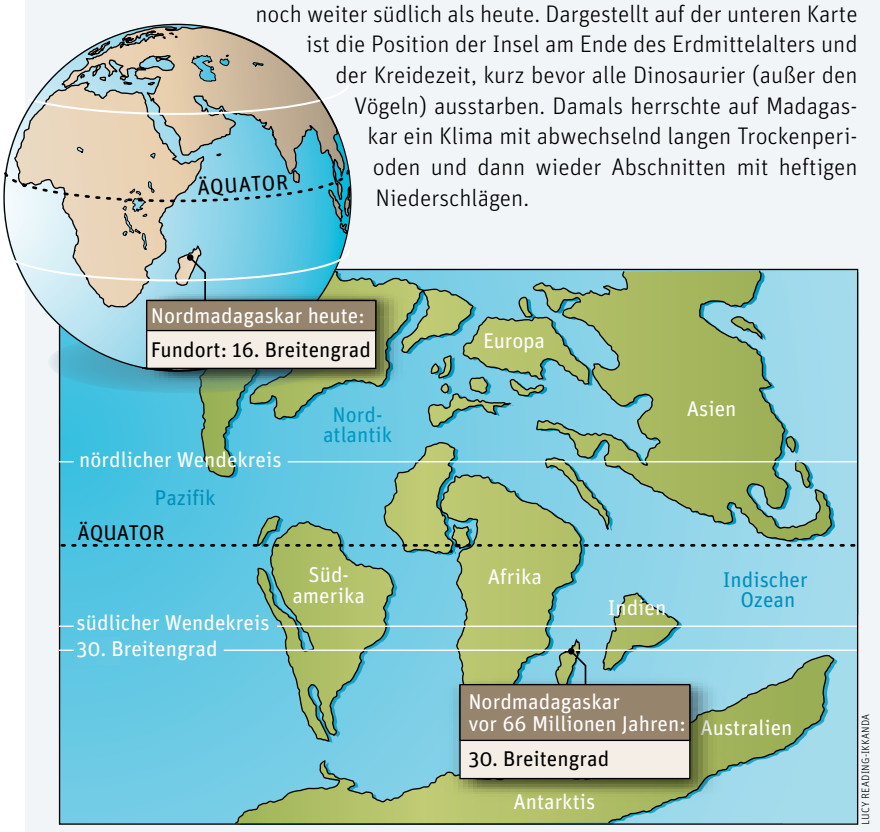
Wir erkannten, dass die Dinosaurier vom Fundort MAD 05-42 nicht alle gleichzeitig verendet waren. Denn manche Skelette wirkten fast unversehrt, von anderen lagen die Einzelteile weit verstreut herum. Außerdem erschien bei einigen Tieren die Oberfläche der Knochen intakt, bei anderen stark verwittert. Das alles kann nur bedeuten: Manche dieser Saurier müssen Wochen, vielleicht Monate später als andere gestorben sein. Genauer können wir die Zeitspanne leider nicht ermitteln. Wir wissen aber: Die ziemlich intakten Skelette dürften rasch zugedeckt worden sein, während die oberflächlich stark zersetzten vor der Fossilisierung noch eine Zeit lang frei gelegen hatten und Sonne und Witterung ausgesetzt waren. Wenn Skeletteile fehlen oder weit verstreut herumliegen, mögen mitunter auch Tiere zugegriffen haben.

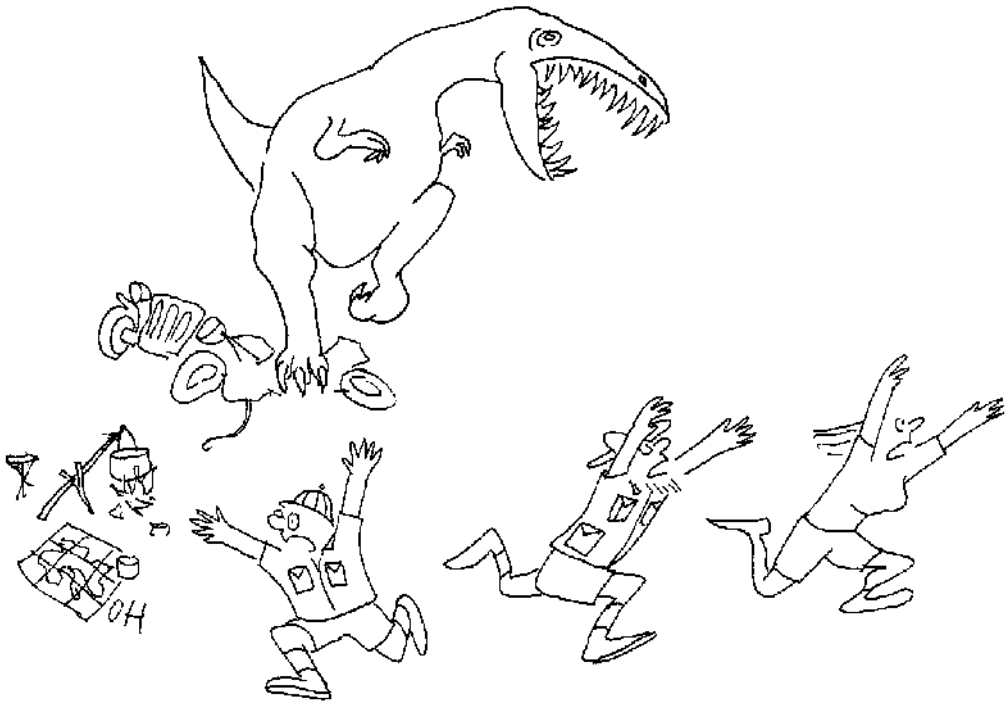
Auf die Ursache des Massensterbens liefert unter anderem die geologische Geschichte Madagaskars Hinweise (siehe Karte S. 28). Vor 250 Millionen Jahren, am Anfang des Erdmittelalters oder Mesozoikums, lag dieses Land im Herzen des Großkontinents Gondwana (der südlichen Hälfte des Ur-Superkontinents Pangäa). Es steckte damals gewissermaßen zwischen Afrika und Indien und reichte im Süden fast bis ans Gebiet der späteren Antarktis. Bald danach veränderten und verschoben sich aber die festen Platten der Erdoberfläche durch tektonische Aktivitäten beträchtlich. Vor 160 Millionen Jahren, im späten Jura, hatte sich Madagaskar von Afrika getrennt und driftete nun nach Süden, mit Indien im Schlepptau. Vor 88 Millionen Jahren, in der späten Kreidezeit, verband sich Madagaskar wieder mit der Afrikanischen Platte, blieb aber eine Insel, die heute an der nächsten Stelle rund 400 Kilometer vom afrikanischen Festland entfernt liegt. Da Indien und die Antarktis allein weiterdrifteten, blieb die heute viertgrößte Insel der Erde isoliert im Indischen Ozean zurück.

Nach der Vereinigung mit der Afrikanischen Platte wanderte Madagaskar wieder nordwärts. So erreichte es schließ- ▷

Madagaskar in der späten Kreidezeit

Als die Fossillager (schwarzer Punkt auf beiden Karten) vor 70 Millionen Jahren entstanden, war Madagaskar schon mit der Afrikanischen Platte verbunden, lag aber noch weiter südlich als heute. Dargestellt auf der unteren Karte ist die Position der Insel am Ende des Erdmittelalters und der Kreidezeit, kurz bevor alle Dinosaurier (außer den Vögeln) ausstarben. Damals herrschte auf Madagaskar ein Klima mit abwechselnd langen Trockenperioden und dann wieder Abschnitten mit heftigen Niederschlägen.





▷ lich seine heutige Position: Mit der Südspitze liegt es jetzt auf dem südlichen Wendekreis, der etwa dem 23. Breitengrad entspricht. Im Norden erreicht es den 12. Breitengrad und damit tropische Höhen. Vor 70 Millionen Jahren befand sich die Insel noch wesentlich weiter südlich. Der Norden lag damals erst auf dem 30. Breitengrad.

Auf der Erde dehnen sich heute zwischen den 15. und 35. nördlichen wie südlichen Breitengraden große Wüsten und Halbwüsten. Dort regnet es selten, aber wenn, dann heftig. Das hängt mit dem Luftzirkulationssystem zwischen dem Äquator und diesen Breiten zusammen (nach einem namhaften britischen Meteorologen Hadley-Zelle genannt). Heiße, trockene Luftmassen, die am Äquator aufgestiegen und abgeregnet sind, wandern in großer Höhe polwärts, kühlen ab und sinken über den Wendekreisen wieder ab, wo sie erneut aufgeheizt werden und den Gebieten Feuchtigkeit entziehen. Der durch die absteigende Luft verursachte hohe Luftdruck hält zudem Regen die meiste Zeit fern.

Die Gesteine der Maevarano-Formation deuten klar darauf hin, dass auf Madagaskar in der späten Kreidezeit solch ein wechselhaftes, halbtrockenes subtropisches Klima herrschte – mithin stark von Jahreszeiten geprägte Bedingungen: lange Trockenzeiten, die manchmal von kräftigen Regenperioden unterbrochen wurden. Besonders bezeugen das die roten Paleosole, die urzeitlichen oxidierten Böden. Sie enthalten vorzüglich bewahrte, lange, senkrechte ehemalige Wurzelgänge. Auch heutzutage wachsen die Wurzeln vieler trockenangepasster Pflanzen in dieser Weise (siehe Kasten S. 31). Dadurch erschließen sie tiefe Wasser- und Nährstoffschichten. Ein anderes Zeichen für Trockenheit sind die Krusten oder Klumpen aus Kalziumkarbonat um oder an vielen der alten Wurzelgänge. Dieses Mineral reichert sich heutzutage gern in oxidierten Böden trockener und halbtrockener Regionen an, wo die Verdunstung selten durch Niederschläge kompensiert wird.

Andere Sedimente lagerten sich damals in flachen, sandigen Flüssen ab. Auch diese Flüsse erzählen von subtropischen Verhältnissen, denn anscheinend führten sie nicht immer – vermutlich nur saisonal – Wasser, dann aber offenbar reichlich. Wenn das Wasser strömte, entstanden in Fließrichtung weisende

charakteristische Muster sich überlagernder Rippeln und Sandbänke. Geologen sprechen von Schrägschichtung. Zeitweise enthielten die Flüsse wohl gar kein Wasser, in anderen Phasen nur eine dicke Brühe aus Schlamm und Sand.

Augenscheinlich pflegten Dinosaurier und viele andere Tiere diese Flüsse aufzusuchen, meist sicherlich zum Trinken, teils wohl zum Fressen, vielleicht manche auch zum Schutz. So beherbergt eines der alten Flussbetten die Knochen der Fundstelle MAD 05-42.

Finden Paläontologen Einzelfossilien, lässt sich die Todesursache oft nicht ergründen. Es gibt zu viele Möglichkeiten, warum ein Tier verendete. Anders ist das bei Massenlagern wie hier in der Maevarano-Formation: Dort lassen sich die Zusammenhänge vielfach besser erfassen und somit mögliche Todesursachen eingrenzen.

Uns fiel auf, dass die verschiedenen madegassischen Knochenlager in der Regel Tierarten verschiedener systematischer Gruppen enthalten und dass nicht an jedem Fundort dieselben Arten liegen. Bei MAD 05-42 fanden wir hauptsächlich diverse Dinosaurier.

Auf der Spur von Massenmord

An der Fundstätte MAD 93-18 entdeckten wir nicht nur drei Dinosaurierarten, sondern auch Fische und Schildkröten, Schlangen, Krokodile, des Weiteren Vögel und Säugetiere (siehe Kasten unten). Demnach konnte es damals ohne Unterschied jeden treffen. Die Größe eines Tiers, sein Alter, seine Lebensweise oder Stammesverwandtschaft hatten anscheinend letztlich wenig Einfluss. Folglich durften wir ausschließen, dass irgendwelche Raubtiere, also etwa Fleisch fressende Dinosaurier oder Krokodile, die Verheerungen angerichtet hatten.

Hinweise auf grassierende Krankheiten fanden wir ebenfalls keine – solche Nachweise an Knochenfossilien sind jedoch zugegebenermaßen schwierig. Plötzlich aufgetretene Naturkatastrophen – etwa Erdbeben, Überschwemmungen oder Flächenbrände – kommen nach unseren Untersuchungen auch nicht als Ursache für den Massentod in Frage. Denn dann wären diese Tiere gleichzeitig gestorben und ihre Überreste ähnlich gut konserviert.

Trotzdem vermuten wir, dass all diese Fossillager letztlich aus immer demselben Grund und auf ähnliche Weise entstanden, weil sich die gleichen Verhältnisse ▷

Wiederholtes Massensterben

Im kreidezeitlichen Madagaskar fanden Tiere immer wieder am selben Ort gehäuft den Tod. Das belegt am deutlichsten der Fundort MAD 93-18, einer der ersten, den Paläontologen entdeckten. Dort liegen drei Lagen mit jeweils vielen Fossilien in getrennten Schichten übereinander. Unter anderem kamen fast vollständige Skelette des Sauropoden *Rapetosaurus*, eines riesigen Pflanzenfressers, zum Vorschein (Bild rechts). Im Bild oben links werden die Knochen dieses Kolosses eingegipst und verpackt.

Zudem entdeckten die Forscher Überreste vieler weiterer, bisher unbekannter Tiere. Dazu gehören auch die zarten Knochen des urtümlichen Vogels *Rahonavis ostromi* (Bild unten links).

RAYMOND R. ROGERS

CATHERINE FORSTER, STONY BROOK UNIVERSITY

DESIRE RANDRIANARISATA, CENTRE VALBIO

▷ wiederholten. Verursacht war das Massensterben stets durch eine fatale Dürrezeit, davon sind wir überzeugt.

Dazu entwickelten wir das folgende Szenario: Die Tiere, deren Fossilien nun an derselben Stätte und in derselben Fundschicht liegen, hatten diesen Ort unabhängig voneinander, wohl meist auch nacheinander, aufgesucht. Wegen zunehmenden Wassermangels sammelten sie sich mehr und mehr an den letzten Wasser- und Schlammpfützen in den austrocknenden Flussbetten. Geschwächt, wie sie waren, blieben sie dort. Als auch diese Ressourcen allmählich versiegten, gingen viele Tiere eines nach dem anderen ein. Manche starben vielleicht direkt an Austrocknung, andere an Hitzschlag. Einige verhungerten, wieder andere mögen sich mit fauligem oder verseuchtem Wasser vergiftet haben. Denn in den brühwarmen, schlickigen Tümpeln könnten fatale Algenblüten aufgetreten sein. Zumindest entdeckte Michael Zavada von der East Tennessee State University in Johnson City, ein Experte für Pollen aus der Kreidezeit, im Gestein an den Knochenfossilien Algensporen. Noch steht allerdings der Nachweis aus, dass diese Sporen tatsächlich zu potenziellen Giftalgen gehörten.

Diese Bilder sind von häufig beobachteten Vorkommnissen in heutigen heißtrockenen Regionen Afrikas und Inneraustraliens angeregt, in denen Tiere in regenlosen Jahreszeiten oft ebenfalls in großer Zahl an gemeinsamen Orten sterben, sei es durch Hitze, Wassermangel oder dergleichen. Forscher kennen von dort regelrechte Todeszonen, wo das Wild in Dürrephasen Jahr um Jahr die wenigen noch vorhandenen Wasserstellen aufsucht, dort verharrt und irgendwann dahinsiecht, wenn der Regen zu lange ausbleibt. In vielen Jahren sterben dann an derselben Stelle Tausende, manchmal sogar Zigtausende von Tieren. Ähnliches könnte sich wiederholt in Flussbetten des kreidezeitlichen Madagaskar zugetragen haben.

Was aber führte dazu, dass die Skelette der Dinosaurier bis heute erhalten blieben, noch dazu viele so hervorragend konserviert? Denn frei auf dem Boden

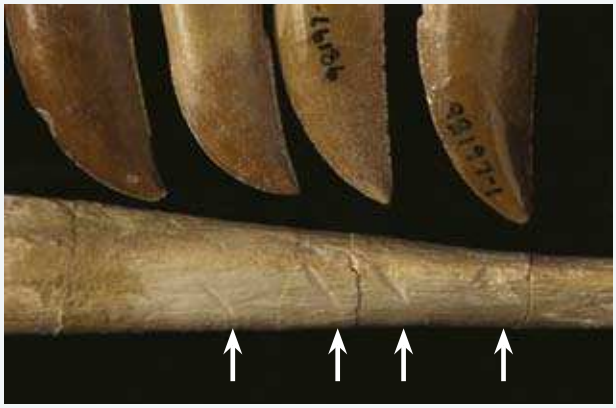
Festmahl für Dino-Kannibalen

Über herumliegende Kadaver machen sich in heutigen Ökosystemen verschiedenste Organismen her, von Bakterien bis zu kleinen und großen Fleischfressern. Das war in der Kreidezeit nicht anders. Zum Beispiel fanden wir zusammen mit Eric M. Roberts, der heute an der Witwatersrand-Universität in Johannesburg arbeitet, im einst schwammartigen Inneren der Knochen zentimeterlange ovale Gruben (Bild oben rechts). Sie dürften von Käferlarven stammen. Aaskäfer müssen in den Kadavern Eier abgelegt haben. Die Larven fraßen ebenfalls das Fleisch, bohrten sich dann aber zum Verpuppen in die Knochen (Bild unten rechts).

Auch Fleisch fressende Dinosaurier gehörten eindeutig zu den Nutznießern, darunter der sieben Meter lange Theropode *Majungatholus atopus*. Zusammen mit Kristina Curry Rogers vom Wissenschaftsmuseum von Minnesota in St. Paul konnten wir seine Bissspuren nachweisen. Er hinterließ sie an mindestens drei Fundorten an etlichen Knochen. Von anderen Fleischfressern können diese Kerben mitsamt den feineren Einritzungen darin nachweislich nicht herrühren. Ihre Größe und ihr Abstand sowie die Ritzspuren passen aber genau zum Gebiss dieses Raubsauriers mit seinen scharfen, spitzen, mit Sägekanten versehenen Zähnen (Bild unten links).

Ein paar jener Knochen mit Kerbspuren gehörten Vertretern des Pflanzen fressenden Sauropoden *Rapetosaurus*. Diese Art beschrieb Curry Rogers erstmals. Die meisten jedoch, überwiegend Rippen und Wirbel, stammten von *Majungatholus* selbst. Es ist auch heute nicht ungewöhnlich, dass Tiere tote Artgenossen fressen. Deswegen nehmen Forscher an, dass unter Dinosaurien Kannibalismus vorkam. Allerdings ist dies der erste klare Nachweis solchen Verhaltens. Leider wissen wir bisher nicht, ob jene Raubsaurier ihre Artangehörigen vorher getötet hatten oder sich nur über deren Kadaver hermachten.

RAYMOND R. ROGERS



MARYLOU STEWART, STONY BROOK UNIVERSITY

RAÚL MARTÍN

herumliegende Kadaver, die Wind und Wetter, Mikroorganismen und allerlei Getier ausgesetzt sind, verschwinden im Allgemeinen schnell. Nicht nur Aasfresser und Kleinstlebewesen machen sich unverzüglich darüber her. Auch was sie übrig lassen, zerfällt bald und gelangt wieder in die ökologischen Kreisläufe. Die Sonne bleicht langsam, aber unaufhaltsam selbst die massiven großen Knochen aus, die schließlich zersplittern und zu Staub zerfallen. Ein Fossil entsteht nur dann, wenn der Kadaver oder das Skelett bald nach dem Tod des Tiers abgedeckt wird. Somit war eine möglichst rasche Einbettung in Sedimente oder andere Ablagerungen stets das entscheidende Ereignis, dank dessen wir heute überhaupt auf Reste urzeitlicher Organismen stoßen. In der Paläontologie sichert sozusagen nur ein rasches Begräbnis Unsterblichkeit.

In unserem Fall hatten wir aus Forschersicht dieses Glück. Die mörderischen Dürreperioden im damaligen Madagaskar währten nicht ewig. Irgendwann wurden sie wieder von heftigen Regenfällen abgelöst. Wassermassen überfluteten nun die zuvor trockenen Flussbetten und wühlten dabei Unmengen grünen Schlick und Sand auf. Dadurch bildete sich ein dicker Brei, der sich an und auf den Dinosaurierknochen ablagerte. Wir können erkennen, dass es sich um einen zähen Schlammfluss handelte, in dem Verwirbelungen nicht aufkommen konnten. Vielmehr bewegte sich dieser Brei wie eine dickflüssige Paste. Solche Schlammfluten kennen wir auch heute. Die verheerenden Schlammrutsche in Guatemala vom Oktober 2005 sind ein Beispiel. Sie entstanden wegen der starken Niederschläge, die der Hurrikan Stan brachte. Damals wurden viele hundert Menschen in den Tod gerissen.

In Madagaskar bedeckten solche Schlammmassen die vielen dicht beieinanderliegenden Tierleichen und Skelettreste. Unter Umständen wiederholte sich das Ganze im folgenden Jahr wieder. Später härteten die Sedimente aus. Die Knochen versteinerten mit der Zeit. 70 Millionen Jahre verstrichen, bis Paläontologen sie wieder ausgruben. ◁

Was die Steine erzählen

Die Fundstelle MAD 05-42 liegt im Bett eines ehemaligen sandigen Flusses. Dessen Wasserführung muss stark geschwankt haben, denn immer wieder lagerten sich in der Strömung Sand- und Schlickmengen ab, welche die Knochen zudeckten. Sie bildeten stromabwärts weisende Rippeln, die sich mit der Zeit zu Serien schräger Schichtungen übereinanderlagerten (Bild oben und unten links). Dass in der Gegend oft Dürre herrschte, beweisen senkrechte Wurzelgänge in anderem Gestein (Bild unten rechts). Sie stammen von Pflanzen, die sehr tief im Boden Wasser aufnehmen mussten. Auch Kalk-Knötchen bei den Wurzeln bezeugen ein semiarides Klima mit monatelangen Trockenzeiten.

DIESE 3 FOTOS: RAYMOND R. ROGERS

Raymond R. Rogers (oben) und **David W. Krause** erforschen die spektakulären Fossillager Madagaskars seit 1996. Rogers ist Professor und Leiter der Abteilung Geologie am Macalester-College in St. Paul (US-Bundesstaat Minnesota) sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Wissenschaftmuseum und am Field Museum in Chicago. Krause ist ebenfalls wissenschaftlicher Mitarbeiter am Field Museum. Er hat eine Professur in der Abteilung der Anatomiewissenschaften an der Stony-Brook-Universität in New York.

Tiere der Urzeit. Im Reich der Dinosaurier und anderer Kreaturen. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2005

Der Tag, an dem die Erde brannte. Von David A. Kring und Daniel D. Durda in: Spektrum der Wissenschaft 2/2005, S. 48

Madagaskar und die ersten Dinosaurier. Von John J. Flynn und André R. Wyss in: Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 26

Monster aus Madagaskar. Von John J. Flynn und David W. Krause in: National Geographic Deutschland, August 2000

The natural history of Madagaskar. Von Steven M. Goodman und Jonathan P. Benstead (Hg.). University of Chicago Press, 2004

Cannibalism in the Madagascan dinosaur *Majungatholus atopus*. Von Raymond R. Rogers, David W. Krause und Kristina Curry Rogers in: Nature, Bd. 422, S. 515, 3. April 2003

Monsters of Madagaskar. Von John J. Flynn und David W. Krause in: National Geographic, Bd. 198, Heft 2, S. 44, August 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893110.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Farbtäuschungen und Gehirn

Experimente mit optischen Täuschungen zeigen, dass das Gehirn Farbe nicht immer getrennt von Form und Tiefe verarbeitet. Farben wirken bei der Gestaltwahrnehmung viel stärker mit als bisher angenommen.

Von John S. Werner, Baingio Pinna und Lothar Spillmann

Ohne Farben würde unserer Welt etwas Wesentliches fehlen. Sie ermöglichen uns nicht nur, die Welt genauer zu erfassen, sondern bringen auch Qualitäten hervor, die es ohne sie nicht gäbe. Das Farbfoto auf der gegenüberliegenden Seite zeigt Herbstblätter im stillen Wasser eines Brunnens, in dem sich außerdem Baumkronen und ein dunkelblauer Nachmittagshimmel spiegeln. Auf der Schwarz-Weiß-Version gleich daneben treten die Blätter weniger deutlich hervor, der Himmel fehlt ganz, die Lichtspiegelungen sind schwach und das Wasser selbst lässt sich kaum erkennen. Die unterschiedliche Tiefe des Himmels, der Bäume und der im Wasser treibenden Blätter ist verschwunden.

Diese Bedeutung der Farbe wird selten gebührend anerkannt, und sogar über ihr Wesen herrschen Missverständnisse. Viele meinen, sie sei eine charakteristische Objekteigenschaft, die ausschließlich von der spezifischen Wellenlänge des vom Gegenstand reflektierten Lichts abhänge. Doch diese Ansicht ist falsch. Farbe ist eine Empfindung, die im Gehirn entsteht. Würden die wahrgenommenen Farben nur von der Wellenlänge des reflektierten Lichts bestimmt, so müsste jedes Objekt bei wechselnder Beleuchtung während des Tages und im Schatten dramatisch die Farbe wechseln. Stattdessen sorgen Aktivitätsmuster im Gehirn dafür, dass ein Objekt trotz veränderter Umgebung in ziemlich konstanter Farbe erscheint.

Die meisten Forscher, die sich mit dem Sehvermögen befassen, meinen übereinstimmend, dass Farbe uns hilft, Objekte zu unterscheiden, sofern Helligkeitsunterschiede dafür nicht ausreichen. Einige finden sogar, Farbe sei eigentlich unnötiger Luxus. Schließlich kommen total farbenblinde Personen sowie viele Tierarten anscheinend ganz gut ohne die differenzierte Farbwahrnehmung aus, die uns Menschen normalerweise auszeichnet. Zum Beispiel sind die für räumliche Orientierung und Bewegungssehen zuständigen Hirnstrukturen an sich farbenblind. Menschen, die durch einen Schlaganfall den Farbsinn einbüßen, vermögen ansonsten normal zu sehen. Aus solchen Beobachtungen wird gefolgert, die Farbverarbeitung sei ein isolierter Prozess; für die Verarbeitung von Tiefe und Form spiele sie keine Rolle. Kurzum: Es gehe dabei eigentlich nur um Farbton, Sättigung und Helligkeit.

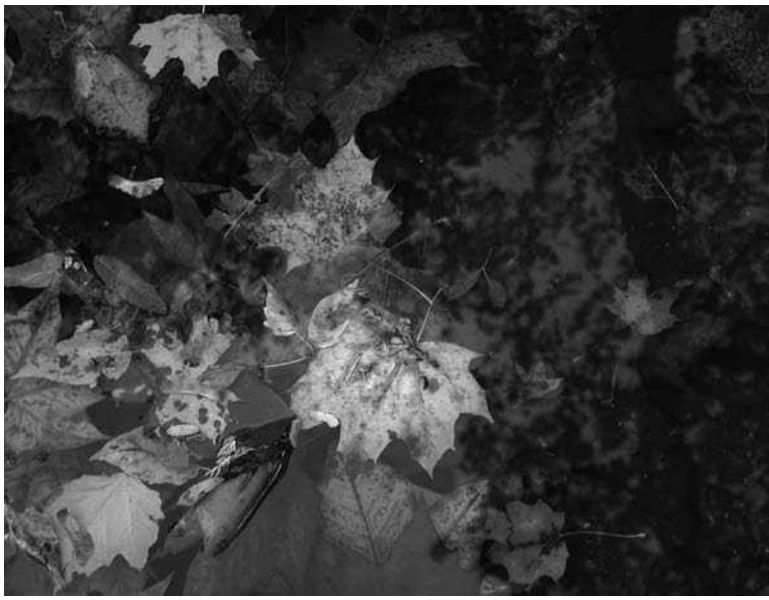
Wie Täuschungen entstehen

Doch wie die Erforschung von Farbtäuschungen – Farben, zu deren Wahrnehmung das Gehirn quasi überlistet wird – demonstriert, läuft die Farbverarbeitung zusammen mit der Verarbeitung anderer Dingeigenschaften wie Form und Grenze ab. Während der letzten zehn Jahre haben wir versucht herauszufinden, wie Farbe die Wahrnehmung anderer Objektmerkmale beeinflusst; zu diesem Zweck haben wir neuartige, teils von uns selbst entwickelte Täuschungsmuster untersucht. Damit verstehen wir allmählich besser, wie die neuronale Farbverarbeitung Eigenschaften von Form und Grenze hervorbringt. Bevor wir uns den verblüffenden Effekten zuwenden, müssen wir kurz rekapitulieren, wie das menschliche Sehsystem Farbe verarbeitet.

Die visuelle Wahrnehmung beginnt mit der Aufnahme von Licht – genauer gesagt, mit der Absorption von diskreten Energiepaketen, den Photonen, durch die Zapfen und Stäbchen in der Netzhaut (siehe Kasten auf S. 34). Die Zapfen dienen dem Sehen bei Tag, die Stäbchen dem bei Nacht. Ein Zapfen-Photorezeptor reagiert gemäß der Anzahl der eingefangenen Photonen; diese Reaktion wird zu zwei verschiedenen Neuronentypen übertragen, den On- und Off-Bipolarzellen. Diese Neuronen wiederum leiten die Informationen an On- und Off-Ganglienzellen weiter, die nebeneinander in der Netzhaut sitzen.

Diese Ganglienzellen haben ein rezeptives Feld vom so genannten Zentrum-Umfeld-Typ. Das rezeptive Feld eines für das Sehen zuständigen Neurons ist derjenige Bereich von Sinnesrezeptoren auf der Netzhaut, der die Aktivität dieses Neurons beeinflusst. Ein Neuron mit einem rezeptiven Feld vom Zentrum-Umfeld-Typ reagiert unterschiedlich je nach der relativen Lichtmenge im Zentrum und in dessen nächster Umgebung.

Eine On-Ganglienzelle wird am stärksten erregt, wenn das Zentrum heller ist als die Umgebung, und am schwächsten, wenn das rezeptive Feld gleichmäßig beleuchtet wird. Off-Gan-

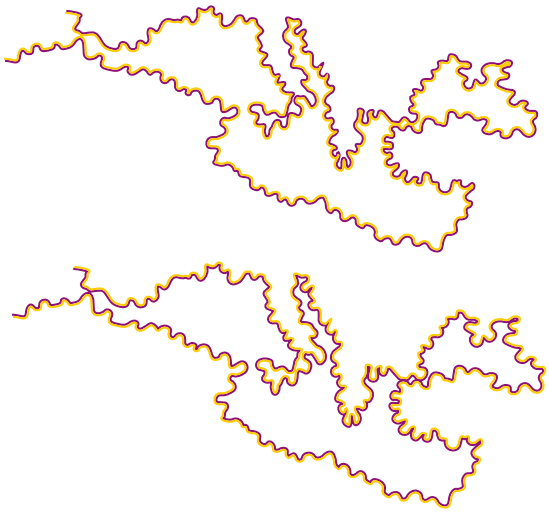


ALLE ABBILDUNGEN DIESES ARTIKELS (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): JOHN S. WERNER, BIANGIO PINNA UND LOTHAR SPILLMANN

Herbstblätter und Spiegelungen in einem Brunnen verdeutlichen, wie Farbe zur Wahrnehmung beiträgt. In der Schwarz-Weiß-Version gehen viele Details verloren und der Eindruck räumlicher Tiefe schwindet.

glienzellen verhalten sich umgekehrt: Sie feuern maximal, wenn das Zentrum dunkler ist, und minimal bei gleichförmiger Beleuchtung von Zentrum und Umfeld. Dieser Gegensatz zwischen Zentrum und Umfeld bedeutet, dass Ganglienzellen auf Kontrast reagieren; auf diese Weise verschärfen sie die Reaktion des Gehirns auf Kanten und Grenzen.

Die meisten Axone – lange faserförmige Fortsätze – der Ganglienzellen leiten die Signale ins Gehirn, zunächst zum seitlichen Kniehöcker *(Corpus geniculatum laterale)* nahe der Gehirnmitte und von dort weiter zur Sehrinde (dem visuellen Cortex) im hinteren Hirnbereich. Unterschiedliche Populationen von Ganglienzellen reagieren auf unterschiedliche Merkmale von Sehreizen – wie Bewegung und Form –, und ihre Axone leiten Signale unterschiedlich schnell. Zum Beispiel werden Farbsignale von langsameren Nervenfasern transportiert.



Beim Wasserfarbeneffekt scheint sich die hellere der beiden Farben auszubreiten. Dies zeigt, wie wichtig Farbe sein kann, um Ausdehnung und Gestalt einer Figur zu umgrenzen. Die Karte des Mittelmeers wird sofort erkennbar, wenn der Farbton, statt scheinbar das Meer zu bedecken (oben), sich über die Landgebiete ausbreitet.

Vermutlich sind gut vierzig Prozent des menschlichen Gehirns am Sehen beteiligt. In den Arealen V1, V2 und V3 der Sehrinde, die bei der visuellen Verarbeitung früh aktiviert werden, sind die Neuronen in Karten organisiert, die eine ortsgetreue Repräsentation des Gesichtsfelds liefern. Von dort aus verteilen sich die visuellen Signale auf mehr als dreißig unterschiedliche Areale, die durch mehr als dreihundert Schaltkreise miteinander verbunden sind. Jedes Areal ist auf bestimmte Funktionen spezialisiert – beispielsweise auf die Verarbeitung von Farbe, Bewegung, Tiefe oder Form –, obgleich kein Areal ausschließlich eine einzige Wahrnehmungsqualität vermittelt. Irgendwie werden all diese Informationen am Ende zur einheitlichen Wahrnehmung eines Gegenstands von bestimmter Gestalt und Farbe verbunden; im Detail verstehen die Neurowissenschaftler diesen Vorgang noch nicht.

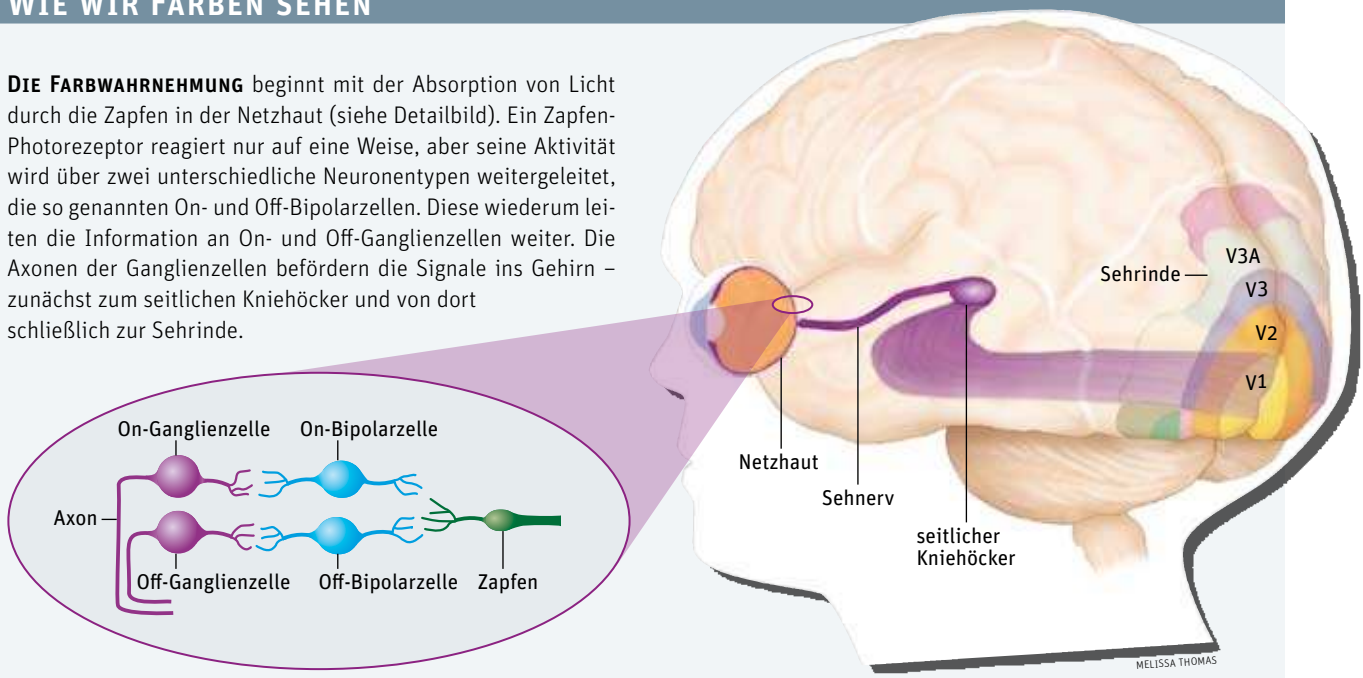
Interessanterweise ist bei bilateraler Schädigung bestimmter visueller Areale sowohl die Form- als auch die Farbwahrnehmung beeinträchtigt – ein starker Hinweis dafür, dass Farbe nicht isoliert von den anderen Objekteigenschaften verarbeitet wird. Da das Gehirn Farbsignale mit Informationen über die Form von Objekten vermischt, können Wahrnehmungen entstehen, die durch bloße Analyse der von den Objekten reflektierten Wellenlängen nicht zu erwarten wären. Unsere Täuschungen verdeutlichen dies eindrucksvoll.

Der Wasserfarbeneffekt

Eines unserer frühen Experimente zeigt, wie wichtig Farbe sein kann, um Form und Ausdehnung eines Gebildes hervorzuheben. Unter bestimmten Bedingungen verändert sie sich je nach der Umgebungsfarbe in Richtung Kontrast oder Assimilation: Sie wird unterschiedlicher oder ähnlicher. Die Ausbreitung ähnlicher Farbe wurde bisher nur für schmale Bereiche beschrieben. Dies passt zu der Erkenntnis, dass die meisten Verbindungen zwischen visuellen Neuronen im Gehirn relativ kurze Reichweiten haben. Daher überraschte uns, dass bei einem farblosen Gebiet, das von zwei verschiedenfarbigen Randkonturen umschlossen wird – wobei die innere Kontur heller ist als die äußere –, der Farbton der inneren Kontur sich über das gesamte eingeschlossene Gebiet ▷

Wie wir Farben sehen

Die Farbwahrnehmung beginnt mit der Absorption von Licht durch die Zapfen in der Netzhaut (siehe Detailbild). Ein Zapfen-Photorezeptor reagiert nur auf eine Weise, aber seine Aktivität wird über zwei unterschiedliche Neuronentypen weitergeleitet, die so genannten On- und Off-Bipolarzellen. Diese wiederum leiten die Information an On- und Off-Ganglienzellen weiter. Die Axonen der Ganglienzellen befördern die Signale ins Gehirn – zunächst zum seitlichen Kniehöcker und von dort schließlich zur Sehrinde.



▷ ausbreitet, sogar über recht große Entfernungen hinweg (siehe Bild S. 33).

Da der Farbschleier an ein schwach getöntes Aquarell erinnert, haben wir diese Täuschung den Wasserfarbeneffekt genannt. Damit er eintritt, müssen die beiden Konturen unmittelbar aneinandergrenzen; dann wirkt die dunklere Farbe als Barriere, welche die hellere Farbe umgibt und ihre Ausbreitung nach außen verhindert. Das durch die illusionäre Wasserfarbe definierte Gebilde erscheint kompakt und leicht erhaben. Werden die Farben der doppelten Kontur vertauscht, erscheint dasselbe Gebiet kalkweiß und leicht vertieft.

Der Wasserfarbeneffekt definiert Figur und Grund noch eindrucksvoller als die Eigenschaften, welche die Gestaltpsychologen zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten: Nähe, Kontinuität, Geschlossenheit, Symmetrie und so weiter. Die hellere Seite der Doppelkontur füllt sich mit Wasserfarbe und wird als Figur wahrgenommen, die dunklere Seite als Grund. Diese Asymmetrie erhöht die Deutlichkeit der Unterscheidung. Das Phänomen erinnert an die Aussage des dänischen Psychologen Edgar Rubin (1886–1951), eines Pioniers der Figur-Grund-Forschung: Die Grenze gehört zur Figur, nicht zum Grund.

Auf neuronaler Ebene lässt sich der Wasserfarbeneffekt wohl so erklären: Die Kombination einer helleren Kontur, die – auf noch hellerem Hintergrund – von einer dunkleren Kontur flankiert wird, aktiviert diejenigen Neuronen, die ausschließlich auf eine Kontur reagieren, welche innen heller ist als außen, oder auf eine, die innen dunkler ist als außen, aber nicht auf beides. Die Zugehörigkeit der Kontur wird höchstwahrscheinlich schon bei frühen Verarbeitungsschritten in der Sehrinde – in den Arealen V1 und V2 – kodiert. Bei Experimenten mit Affen haben Neurophysiologen festgestellt, dass rund die Hälfte der Neuronen in der Sehrinde auf den Verlauf des Kontrasts – in Richtung heller oder dunkler – reagiert und damit die Grenze definiert. Dieselben Neuronen spielen auch eine Rolle bei der Tiefenwahrnehmung, die ihrerseits zur Figur-Grund-Trennung beitragen dürfte.

Nach unseren Untersuchungen bewirken geschlängelte Linien einen stärkeren Wasserfarbeneffekt als gerade, vielleicht weil eine wellenförmige Grenze mehr Neuronen aktiviert, die auf Orientierung ansprechen. Die von diesen unregelmäßigen Konturen signalisierte Farbe muss über Hirnareale weitervermittelt werden, die große Bereiche des Gesichtsfelds abdecken. Dabei breitet sich die Farbe weiter aus, bis Zellen, die auf Konturen reagieren, auf der anderen Seite des umschlossenen Gebiets die Farbausbreitung stoppen. Farbe und Form werden auf diese Weise im Gehirn – und ebenso in der Wahrnehmung – untrennbar miteinander verknüpft.

Ein weiteres Indiz für die Rolle, welche die Farbe für die Unterscheidung von Figur und Grund spielt, liefert die Radiallinien-Illusion. Im Jahr 1941 zeigte der deutsche Psychologe Walter Ehrenstein

In Kürze

- Die **Sehforschung** ging lange Zeit davon aus, das Gehirn verarbeite Farbe unabhängig von anderen Eigenschaften wie **Tiefe** und **Form**.
- Doch wie die Untersuchung von **Farbtäuschungen** enthüllt, bringt die Farbwahrnehmung auch Eigenschaften von Form und Tiefe hervor.
- Insbesondere haben die Autoren die Ehrenstein-Figur modifiziert, um zu zeigen, wie das Gehirn bei der **Wahrnehmung der Welt** eine enge Verbindung von Farbe, Gestalt und Form herstellt.

(1899–1961), dass das kreisförmig ausgesparte Zentrum von radial aufeinander zulaufenden Linien durch eine deutlich hellere Scheibe ausgefüllt wird. Der Aufhellung und ihrer Grenze entspricht kein physikalischer Reiz; beide entstehen in unserem Kopf. Die helle Scheibe erscheint leicht erhaben über den Radiallinien (siehe Bild rechts oben).

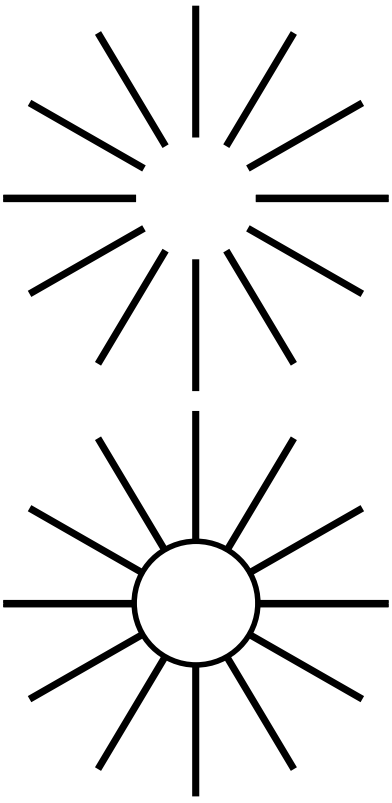
Variierte Ehrenstein-Täuschung

Die Stärke des Phänomens hängt von Länge, Breite, Anzahl und Kontrast der radialen Linien ab. Aus der für die Täuschung nötigen Linienanordnung folgt, dass es Neuronen geben muss, die auf das Ende einer Linie reagieren. Solche Nervenzellen – endgestoppte Neuronen genannt – wurden tatsächlich in der Sehrinde nachgewiesen. Ihre lokalen Signale werden offenbar kombiniert und als Input an ein Neuron zweiter Ordnung weitergeleitet, welches in unserem Beispiel den zentralen Bereich mit verstärkter Helligkeit füllt.

In unseren Untersuchungen der Ehrenstein-Täuschung haben wir Anzahl, Länge und Breite der Radiallinien variiert. Hier zeigen wir die eindrucksvollsten Kombinationen. Um die Wirkung zu verstärken, präsentieren wir Quartette aus vier Exemplaren eines Musters. In Vorversuchen ermittelten wir die Radiallinien, welche die stärkste Aufhellung erzeugten (❶, Bild rechts) Dann experimentierten wir mit verschiedenen chromatischen Eigenschaften des Zentralbereichs.

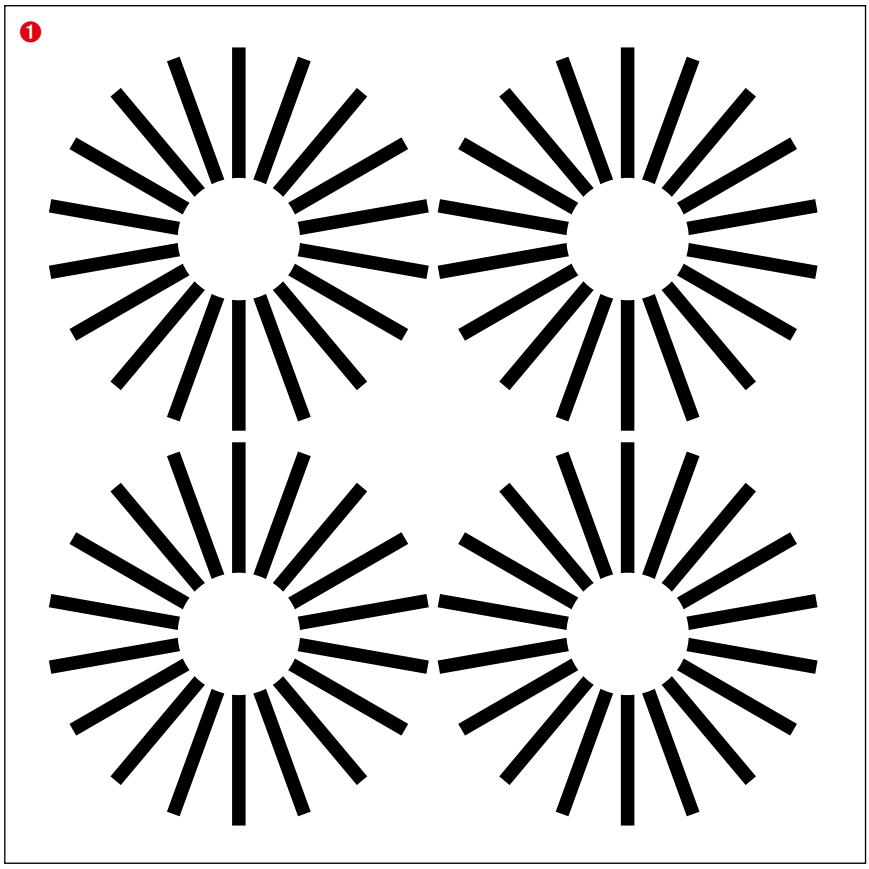
Zunächst fügten wir in die Ehrenstein-Figur einen schwarzen Ring ein. Die zentrale Aufhellung verschwand völlig – die Täuschung wurde zerstört, wie Ehrenstein selbst bereits festgestellt hatte. Als Grund vermuten wir, dass der Ring die Zellen, die auf das Ende einer Linie ansprechen, deaktiviert.

Doch wenn der Ring gefärbt wird, werden dadurch offenbar andere Zellen angeregt. Als wir einen farbigen Ring einfügten, erstrahlte die weiße Fläche nicht nur noch heller als in der üblichen Ehrenstein-Figur, sondern wirkte auch dichter, als wäre Deckweiß auf das Papier aufgetragen worden (❷, siehe Bild S. 36 oben). Dieses Phänomen überraschte uns. Selbstleuchten und Oberflächenqualitäten treten normalerweise nicht gemeinsam auf; sie gelten als gegensätzliche, sogar einander ausschließende Erscheinungen. Wir nennen das Phänomen anomale Helligkeitsinduk- ▷



Die Ehrenstein-Figur, 1941 vom deutschen Psychologen Walter Ehrenstein entwickelt, bildet die Grundlage für die im Folgenden gezeigten Täuschungen. Der Eindruck einer kreisförmigen Aufhellung verschwindet, wenn ein schwarzer Ring eingefügt wird (unten).

Besonders hell erscheint die kreisförmige Aufhellung, wenn die Ehrenstein-Figur zur Verstärkung der Täuschung modifiziert wird.



▷ tion. Wie der Wasserfarbeneffekt wird auch diese Täuschung vermutlich von Zellen in früh aktivierten Arealen der Sehrinde verursacht.

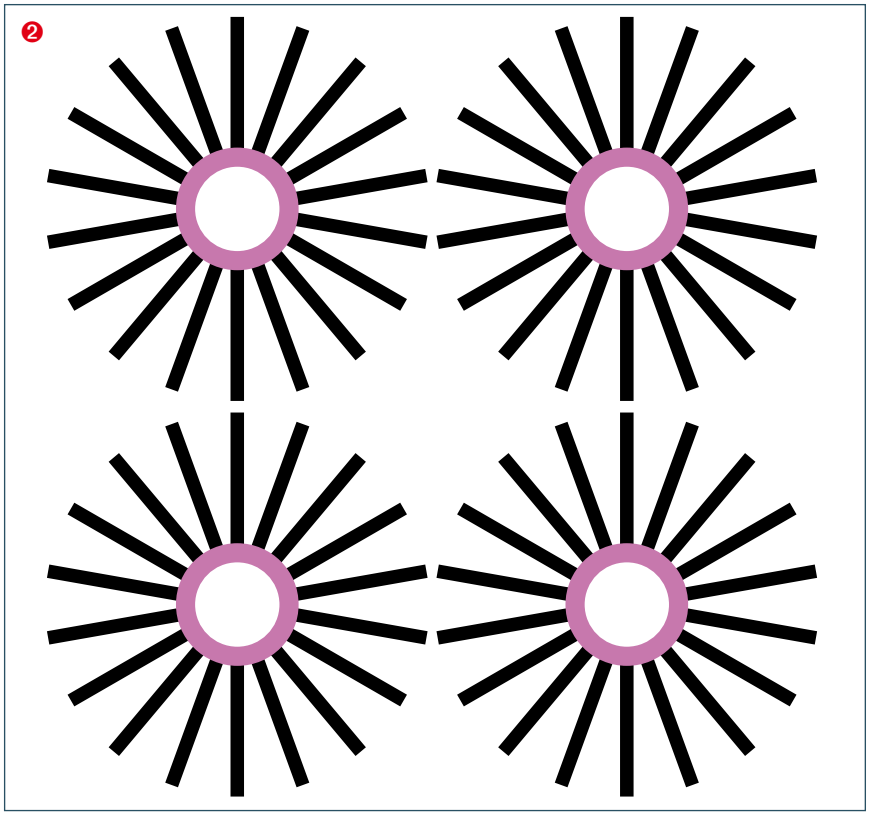
Sodann setzten wir in die zentrale Lücke der Ehrensteinfigur eine graue Scheibe (❸, Bild unten). Dadurch entstand ein weiteres Phänomen, szintillierender Glanz genannt: Bei jeder Bewegung des Musters oder des Auges wird statt scheinbarer Helligkeit ein unstetes Flimmern wahrgenommen. Dieses Flackern kommt vielleicht durch einen Wettstreit zwischen dem On- und Off-System zu Stande; die scheinbare Helligkeitssteigerung durch die Radiallinien konkurriert mit der physikalischen Helligkeitsminderung durch das dunkle Grau der Scheibe.

Wenn wir das Weiß im Farbring durch Schwarz ersetzten und schwarzen Grund verwendeten, sah die Scheibe noch dunkler aus als die – physikalisch identische – Umgebung (❹, Bild S. 37 oben). Während weiße Scheiben selbst zu leuchten scheinen, wirkt die Schwärze wie ein schwarzes Loch, das alles Licht absorbiert.

Färbten wir die zentrale Scheibe im farbigen Ring grau, so schien sie andeutungsweise die Komplementärfarbe des Rings anzunehmen – das heißt ein schwaches Grüngelb, falls der umgebende Ring lila war (❺, Bild S. 37 unten). Außerdem flackerte die Scheibe bei jeder Bewegung von Auge oder Muster und verschob sich ein wenig gegenüber ihrem Grund. Dieser anomale Farbkontrast wird zwar wie die anderen Effekte durch Radiallinien und einen Farbring verursacht, aber er zeigt einzigartige Eigenschaften, die offenbar nicht durch bloße Kombination der zuvor beobachteten Effekte entstehen. Bei dieser Täuschung scheint die erzeugte Farbe zugleich selbst zu leuchten und zu szintillieren – und obendrein unruhig über dem restlichen Bild zu schweben. Die Oberflächenfarbe und die selbstleuchtende Farbe vermischen sich nicht; die eine gehört zu der Scheibe auf dem Blatt, die andere entwickelt sich aus einer Kombination der übrigen Reizmerkmale.

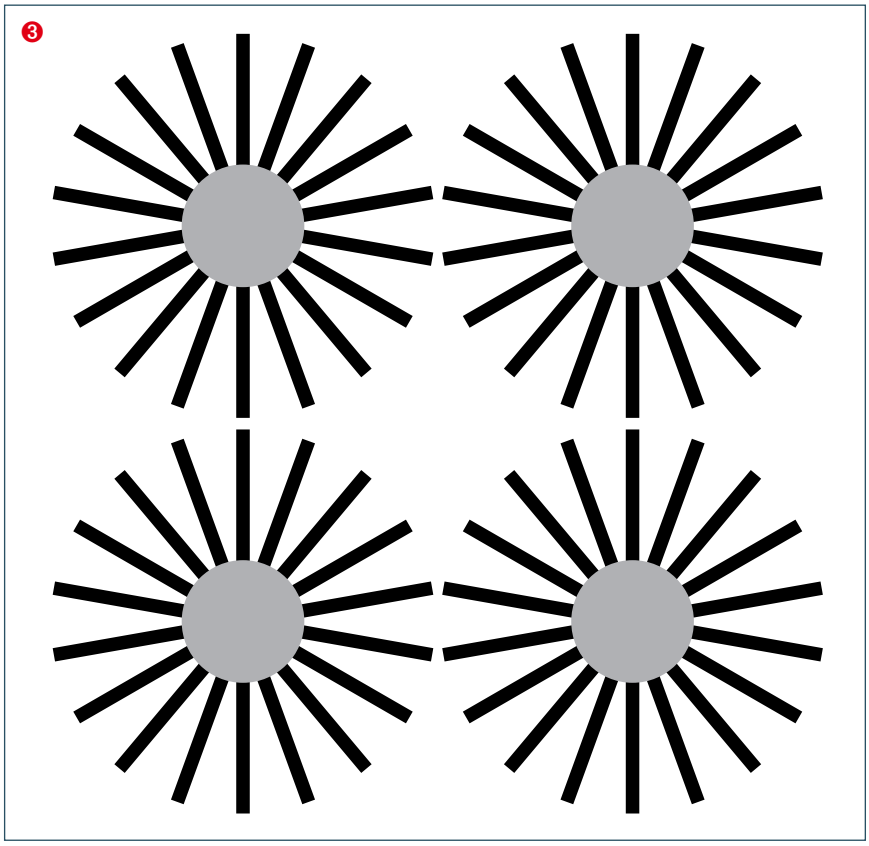
Beim blitzenden anomalen Farbkontrast aktivieren die Radiallinien vermutlich lokale endgestoppte Neuronen – wie beim Ausfüllen von Lücken durch Scheinkonturen –, aber die Aktivität dieser Zellen allein vermag die Kombination von Blitzen und Komplementärfarben nicht zu erklären. Unklar ist, ob die Radiallinien eine direkte Wirkung

❷

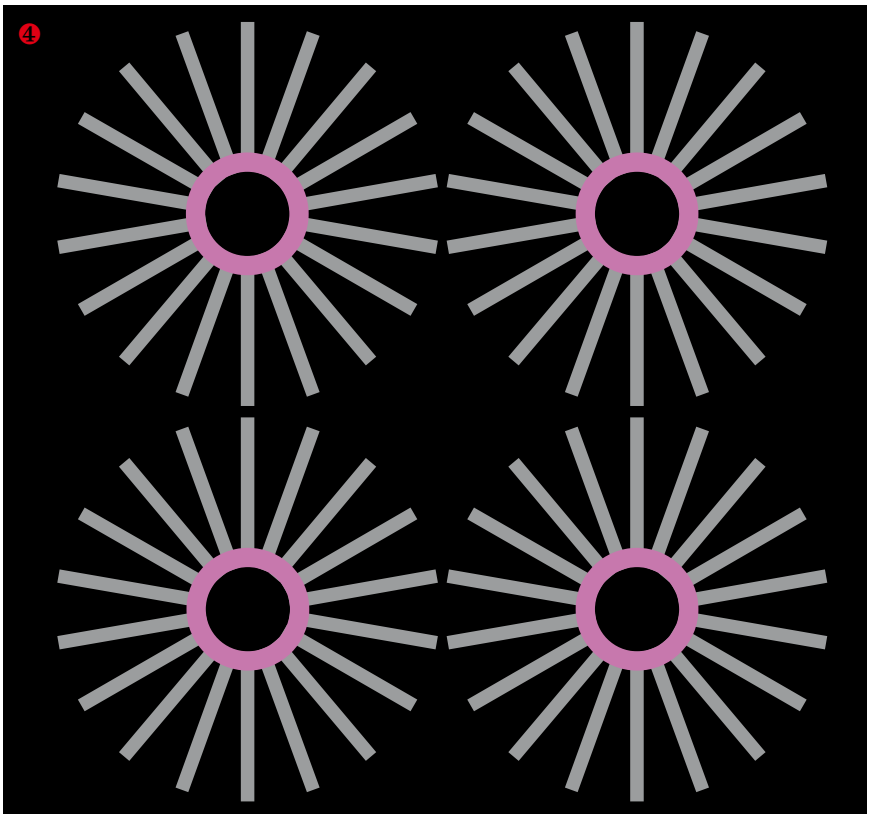


Die »anomale Helligkeitsinduktion« entsteht, sobald ein farbiger Ring hinzugefügt wird. Dadurch wirken die zentralen Flächen noch weißer.

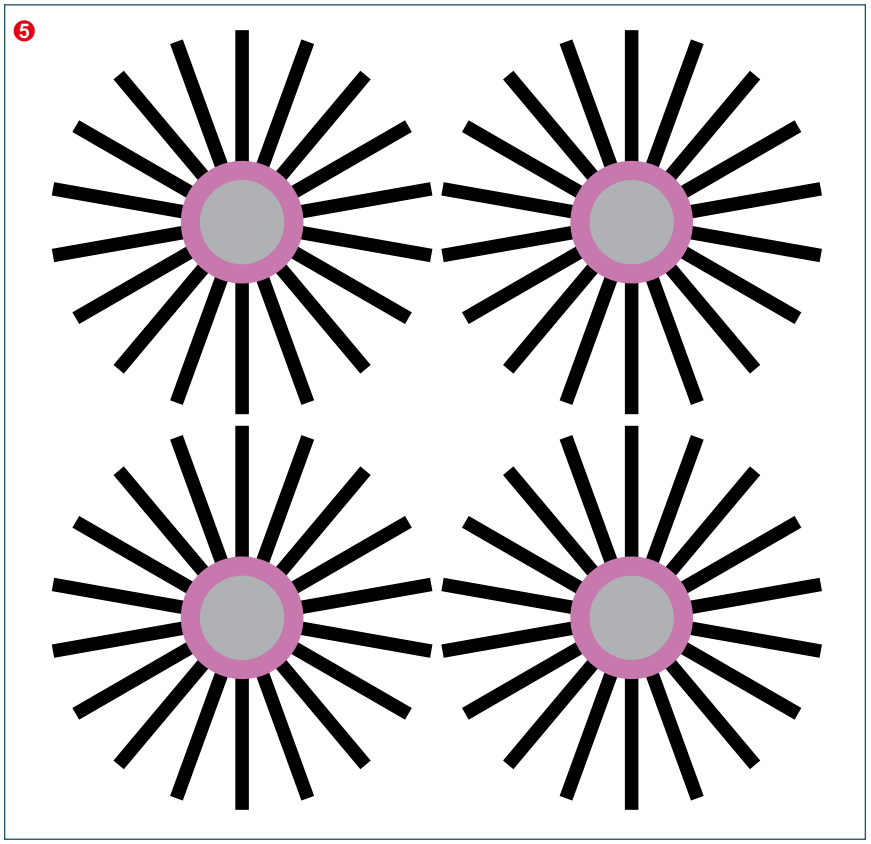
❸



Graue Scheiben bewirken »szintillierenden Glanz«: Die zentralen grauen Kreisflächen scheinen zu flimmern.



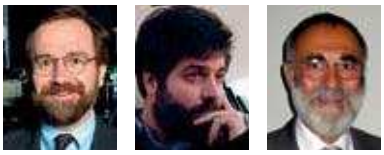
Die »anomale Dunkelheitsinduktion« entsteht durch einen farbigen Ring auf schwarzem Grund. Die Innenfläche erscheint schwärzer als die – physikalisch ebenso schwarze – Umgebung.



Graue Scheiben in lila Ringen erzeugen den »blitzenden anomalen Farbkontrast«. Bei geringfügiger Bewegung von Auge oder Muster erscheinen die Scheiben als grünlich-gelblich flackernde Lichter.

auf den Farbkontrast ausüben oder ob die lebhafte Farbe indirekt aus dem durch die Kombination von Radiallinien und grauem Zentrum verursachten szintillierenden Glanz hervorgeht.

Unser derzeitiges Wissen über das Gehirn vermag diese Täuschung nicht vollständig zu erklären. Sie ist so komplex, dass ihr wohl kein einzelner Prozess zu Grunde liegt, sondern ein Versuch des Gehirns, konkurrierende Signale vieler spezialisierter Übertragungswege in Einklang zu bringen. Die Wissenschaft muss offenbar noch viel darüber lernen, wie das Gehirn die Welt wahrnimmt. Die Erforschung komplexer Farbtäuschungen eröffnet einen viel versprechenden Zugang zu bisher unbekannten Eigenschaften des menschlichen Sehsystems. ◁



John S. Werner (links) promovierte in Psychologie an der Brown-Universität in Providence (Rhode Island) und forschte am TNO-Institute for Perception in Soesterberg (Niederlande). Er ist Professor an der Universität von Kalifornien in Davis. **Baingio Pinna** (Mitte) promovierte an der Universität Padua; er ist Professor an der Universität von Sassari (Italien). **Lothar Spillmann** leitete bis 2005 das Labor für visuelle Psychophysik an der Universität Freiburg; er forschte am Massachusetts Institute of Technology sowie an der Retina Foundation und Massachusetts Eye & Ear Infirmary in Boston. Im Exploratorium in San Francisco sind Täuschungsmuster von Pinna und Spillmann zu besichtigen.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

The watercolor illusion and neon color spreading: A unified analysis of new cases and neural mechanisms. Von B. Pinna und S. Grossberg in: Journal of the Optical Society of America, Bd. 22, S. 2207, 2005

Flashing anomalous color contrast. Von B. Pinna, L. Spillmann und J. S. Werner in: Visual Neuroscience, Bd. 21, S. 365, 2004

The watercolor effect: A new principle of grouping and figure-ground organization. Von B. Pinna, J. S. Werner und L. Spillmann in: Vision Research, Bd. 43, S. 43, 2003

Visual perception: The neurophysiological foundations. Von L. Spillmann und J. S. Werner (Hg.). Academic Press, 1990

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893100.

Hören Sie dazu auch unseren **Podcast** unter www.spektrum.de/talk.

IceCube – Neutrinojagd am Südpol

Tief ins Eis der Antarktis versenkt, registriert ein außergewöhnliches Teleskop Teilchen der kosmischen Strahlung: »IceCube« soll ein neues Fenster zum All eröffnen.

In Kürze

- **Neutrinos transportieren Informationen** aus Regionen des Kosmos, die mit anderen Methoden nicht einsehbar sind. Auch zur Klärung des Ursprungs der energiereichen kosmischen Strahlung können sie beitragen.
- Am Südpol wird **das bisher größte Neutrinoteleskop** errichtet: IceCube. Es besteht aus zahlreichen Fotovervielfachern, die in das Eis eingelassen werden. Mit dem schrittweisen Ausbau nimmt seine Empfindlichkeit von Jahr zu Jahr zu.
- Wenn IceCube im Jahr 2011 fertig gestellt sein wird, soll es die Empfindlichkeit von Vorgängerteleskopen **um etwa das Hundertfache** übertreffen.

Von Christian Spiering

Am 15. Januar 2005 begannen Physiker und Ingenieure mit einem Strahl 90 Grad Celsius heißen Wassers ein Loch in den Eispanzer am Südpol zu schmelzen. Pro Minute pressten sie 750 Liter in das Eisloch und trieben es dabei um einen weiteren Meter in die Tiefe. Starke Pumpen saugten das abgekühlte Wasser zurück an die Oberfläche, wo es erhitzt und wiederum ins Bohrloch geführt wurde. Nach 52 Stunden reichte das Loch in eine Tiefe von 2450 Metern.

In den nächsten 20 Stunden versenkten Mitarbeiter des Teams eine Kabeltrosse mit 60 Glaskugeln, jede so groß wie ein Medizinball, in den engen Schacht. Die druckfesten Kugeln bergen hochempfindliche Lichtsensoren, die in regelmäßigem Abstand ab 1450 Meter Tiefe bis zum Grund des Bohrlochs angeordnet sind (siehe Bild auf S. 43). Zwei Wochen später war das Schmelzwasser im Bohrloch vollständig gefroren.

Was sich eher nach einem glaziologischen Experiment als nach Astronomie anhört, war dennoch der Baubeginn eines großen Teleskops. Bereits drei Wochen später nahm die erste von 80 Trossen des Neutrinoteleskops IceCube ihren Betrieb auf. Bis zum Januar 2011 soll dieses Instrument fertig gestellt sein. Dann wird es hundertmal so empfindlich sein wie existierende Instrumente und den Himmel nach Neutrinoquellen im Weltall absuchen.

Rund 200 Wissenschaftler aus acht Ländern wollen damit unter anderem den Ursprung der kosmischen Strahlung, das Wesen der Dunklen Materie sowie exotische Elementarteilchen erforschen. Aus Deutschland sind neben dem Teilinstitut des Deutschen Elektronen-Synchrotons (Desy) in Zeuthen bei Berlin auch die Universitäten Aachen, Berlin (Humboldt-Universität), Dortmund, Mainz und Wuppertal sowie das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg beteiligt.

Wie kraftvoll geworfene Steine

Fast ein Jahrhundert ist vergangen, seit die kosmische Strahlung entdeckt wurde. Wir wissen inzwischen, dass sie vorwiegend aus Protonen besteht, mit einer Beimischung aus leichten und schweren Kernen. Ihre Energiedichte in unserer Galaxis entspricht ungefähr jener des Sternenlichts, der kosmischen Hintergrundstrahlung oder galaktischer Magnetfelder. Die kosmische Strahlung ist demzufolge keineswegs eine Randerscheinung des Universums, sondern ein wichtiger Bestandteil.

Noch bemerkenswerter ist, welche Energien diese Teilchen erreichen können: Bis zu $3 \cdot 10^{20}$ Elektronenvolt wurden gemessen. Das ist das Dreihundertmillionenfache der Energie, auf die es der Beschleuniger »Tevatron« im amerikanischen Fermilab nahe Chicago bringt, der bisherige irdische Rekordhalter. In einer gebräuchlicheren Einheit ausgedrückt, sind das 50 Joule. Dies entspricht der Energie eines kraftvoll geworfenen Steins. Konzentriert auf ein einziges subatomares Teilchen mutet das fantastisch an.

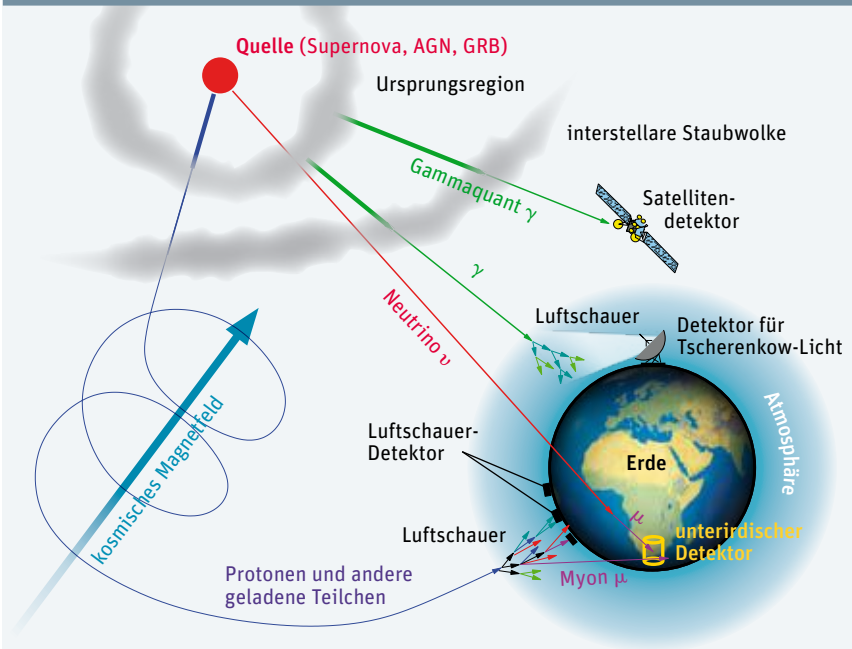
Bislang ist weit gehend ungewiss, woher die Teilchen der kosmischen Strahlung stammen und welche Prozesse sie auf diese gewaltigen Energien beschleunigen. Zu dieser Ungewissheit trägt entscheidend bei, dass geladene Teilchen abgelenkt werden, wenn sie ausgedehnte kosmische Magnetfelder durchqueren. Dabei geht die Information über ihre Ursprungsrichtung verloren. Erst bei Teilchenenergien von mehr als 10^{19} Elektronenvolt können wir die Ablenkung in Magnetfeldern vernachlässigen – doch mit einem Teilchen pro Quadratkilometer und Jahr machen diese nur einen Bruchteil der kosmischen Strahlung aus.

Immerhin gibt es mehrere Kandidaten für kosmische Beschleuniger. Eine wichtige Rolle spielen vermutlich Stoßwellen, die sich mit großer Wucht in ein langsameres Medium ausbreiten. Das passiert etwa, wenn massereiche Sterne ▷

Eisige Fallen für Neutrinos bei der Amundsen-Scott-Station (großes Bild, links). Neben Radioteleskopen beherbergt der astronomische Bereich (rechts) auch die ins Eis eingelassenen Neutrinoteleskope Amanda und IceCube (im kleinen Bild mit einem Kreis beziehungsweise einem Sechseck markiert).

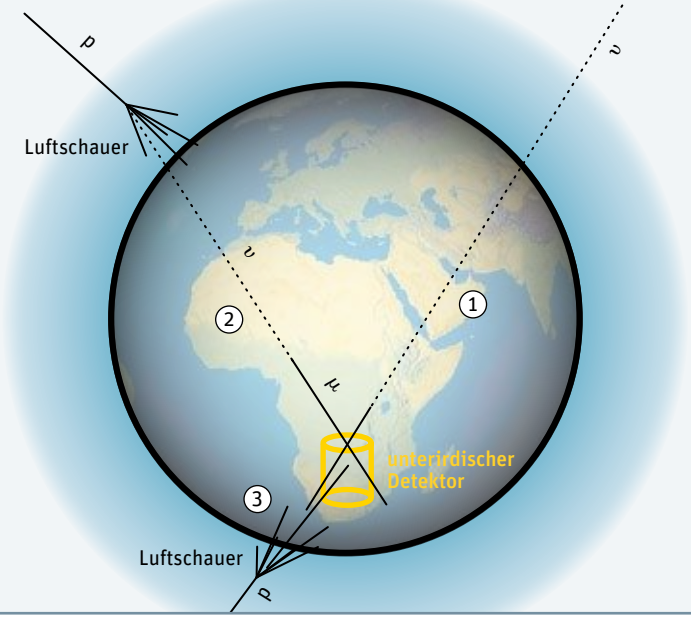
GR. FOTO: FOREST BANKS / NSF UND UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON; KL. FOTO: C. SPIERING

Aus dem All ins Labor: Die Reise der Neutrinos



Elektrisch geladene Teilchen wie Protonen werden von kosmischen Magnetfeldern abgelenkt, wodurch die Information über ihre Ursprungsrichtung verloren geht. Photonen werden von Staub oder von anderen Photonen absorbiert oder gestreut. Da Neutrinos weder absorbiert noch von Magnetfeldern aus ihrer geraden Bahn gebracht werden, bieten sie alternative Möglichkeiten als Boten kosmischer Information.

Myonen, die in einen Neutrinodetektor von unten eintreten, müssen aus Wechselwirkungen mit Neutrinos entstanden sein, denn nur diese sind in der Lage, den Erdball zu durchqueren. Außer extraterrestrischen Neutrinos (1) registriert man vorwiegend atmosphärische Neutrinos (2), die aus der Wechselwirkung von Protonen der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre hervorgehen. Myonen können auch oberhalb des Detektors in der Atmosphäre entstehen und bis in die Tiefe durchschlagen (3). Diese Myonen muss man wegfiltern, um nur die klaren, von unten kommenden Neutrinokandidaten übrig zu behalten.



CHRISTIAN SPIERING, DESY; WOLFGANG WAGNER, UNIVERSITÄT DORTMUND

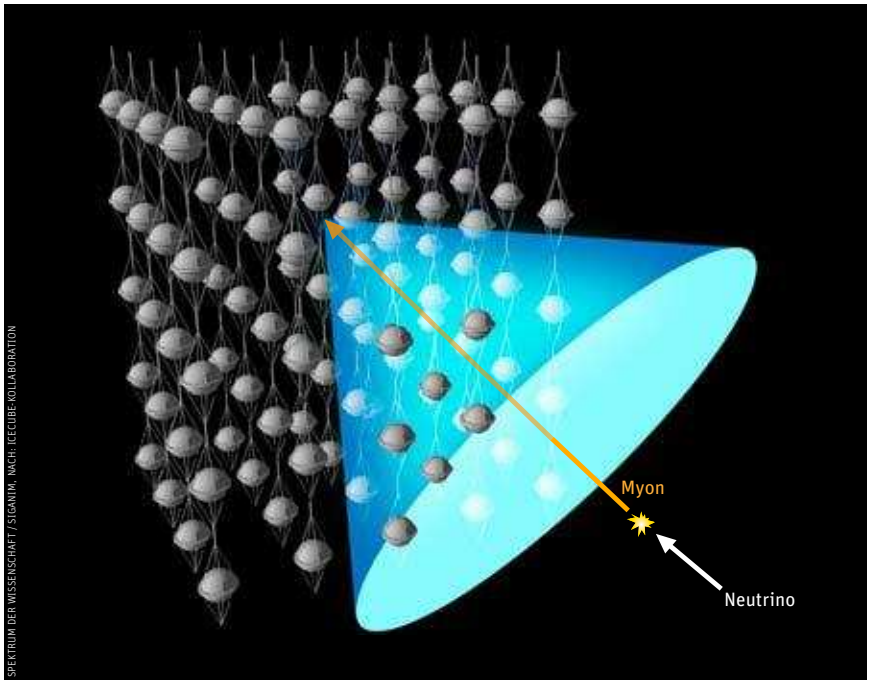
▷ ihre Hüllen absprengen und als Supernovae verglühen. Die in der Explosion ausgeworfene Materie breitet sich mit einer Geschwindigkeit von einigen zehntausend Kilometern pro Sekunde in den interstellaren Raum aus. An ihrer Front werden geladene Teilchen beschleunigt, bis sie von den umgebenden Magnetfeldern nicht mehr gebunden werden können und entweichen. In den Hüllen von Supernovae können Teilchen vermutlich auf bis zu 10^{16} Elektronenvolt beschleunigt werden. Noch höhere Energien dürften in den Polkappen junger Neutronensterne erreicht werden sowie in den beim Verschmelzen von Galaxien entstehenden Stoßwellen.

Nur zwei Kandidaten kommen jedoch in Frage, wenn es darum geht, die höchsten Teilchenenergien zu erklären: Aktive Galaktische Kerne (*Active Galactic Nuclei*; AGNs) und Gammastrahlenausbrüche (*Gamma Ray Bursts*; GRBs). In beiden Fällen rotiert Materie in einer so genannten Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch und wird von diesem wie von einem gewaltigen Mahlstrom eingesaugt. Dabei werden große Mengen Gravitationsenergie freigesetzt, die wiederum riesige »Jets« antreiben: Materieströme, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum ausbreiten, senkrecht zu der ursprünglichen Materiescheibe. In den Stoßwellen entlang dieser Jets könnten Teilchen bis auf 10^{20} Elektronenvolt beschleunigt werden. Während AGNs ihre Energie über Jahrmillionen abgeben, strahlen GRBs nur über einige Sekunden oder Minuten, dafür jedoch mit umso größerer Intensität.

Sieht man von den energiereichsten Teilchen der Strahlung ab, können die kosmischen Beschleuniger nur mit elektrisch neutralen Informationsträgern wie Photonen oder Neutrinos lokalisiert werden, denn diese werden von kosmischen Magnetfeldern nicht abgelenkt. Sowohl hochenergetische Neutrinos wie auch Photonen müssen in Reaktionen der beschleunigten, geladenen Teilchen entstehen, wenn diese auf Ansammlungen anderer geladener Teilchen oder auf Ultraviolett-Photonen stoßen, die ein dichtes »Photonengas« bilden. Derartige Stoßpartner existieren vermutlich innerhalb oder in der Nähe vieler kosmischer Beschleuniger.

Kosmische Neutrinos werden vor allem in Stößen beschleunigter Protonen oder Atomkerne gebildet, während Pho-

So funktionieren Neutrinoteleskope in tiefem Wasser oder Eis: In einem Raumgitter aufgehängte Fotovervielfacher registrieren den Kegel des Tscherenkow-Lichts, den geladene relativistische Teilchen in Eis oder Wasser hinter sich herziehen. Daraus lässt sich die Herkunftsrichtung der Partikel ermitteln.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM, MACH; ICECUBE-KOLLABORATION

tonen auch bei Stößen beschleunigter Elektronen entstehen. Man hat schon zahlreiche Quellen entdeckt, die Photonen mit Energien von mehreren Tera-Elektronenvolt abstrahlen (1 TeV = 10^{12} eV). Dazu gehören Supernova-Überreste, Doppelsternsysteme und AGNs. Aus dem beobachteten Spektrum der elektromagnetischen Strahlung können wir aber schließen, dass in den Quellen vorwiegend Elektronen beschleunigt werden – kaum die Protonen und Atomkerne der kosmischen Strahlung. Damit bleibt die Frage nach ihrem Ursprung weiterhin unbeantwortet. Der Schlüssel zu diesem Rätsel könnte bei den Neutrinos liegen.

Die Existenz dieser Teilchen wurde 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um die Energiebilanz des radioaktiven Betazerfalls auszugleichen. Der österreichische Physiker setzte voraus, dass diese Teilchen kaum mit Materie reagieren, und hielt es für unmöglich, sie experimentell nachzuweisen. Nachdem in den 1940er Jahren mit den ersten Kernreaktoren starke Neutrinoquellen existierten, gelang es jedoch 1956 Frederick Reines und Clyde Cowan erstmals, Neutrinoreaktionen aufzuzeichnen.

Durchdringende Boten

Inzwischen haben die Physiker herausgefunden, dass es drei Neutrinosorten gibt: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino. Neutrinos spüren weder die starke Kernkraft, die Protonen und Neutronen in Atomkernen zusammenhält, noch die elektromagnetische Kraft. Sieht man von der Schwerkraft ab, unterliegen sie nur der schwachen Kernkraft, die etwa für den radioaktiven Betazerfall zuständig ist. Aus diesem Grund reagieren sie so selten.

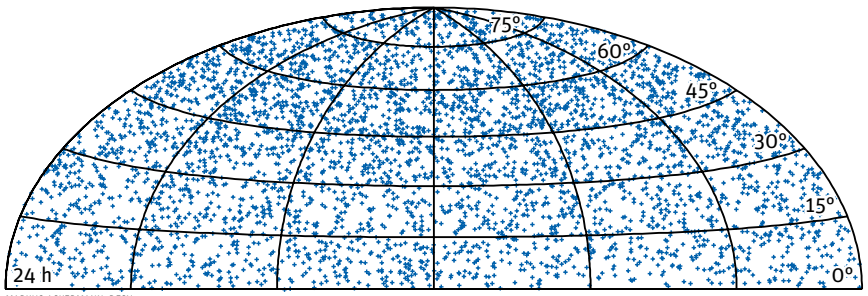
Die uns nächstgelegene kosmische Neutrinoquelle ist die Sonne. Zwar erreichen uns von ihr pro Quadratzentimeter und Sekunde 60 Milliarden Neutrinos, doch stößt davon kaum ein Dutzend mit einem Atom des Erdinnern zusammen – der Rest durchquert die Erde ungestört. Paradoxerweise macht genau diese Eigenschaft Neutrinos als kosmische Boten interessant. Fast ungehindert können sie die dicksten Materieschichten durchdringen und aus Regionen entweichen, aus denen kein Licht zu uns kommt. Sie können uns einzigartige Aufschlüsse über das Zentrum der Sonne übermitteln, in dem sich die Kernreaktionen abspielen, aus denen die Sonne ihre Energie bezieht. Neutrinos entkommen auch aus den kompakten Objekten, zu denen massereiche Sterne in Supernova-Explosionen kollabieren.

Tatsächlich waren die ersten Quellen, von denen extraterrestrische Neutrinos beobachtet wurden, die Sonne sowie die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, einer Begleitgalaxie des Milchstraßensystems. Am 23. Februar 1987 trafen Neutrinos von SN 1987A auf die Erde und wurden unter anderem in Japan im unterirdischen Kamiokande-Observatorium registriert.

Die Neutrinos der Sonne und dieser Supernova wurden mit Detektoren aufgefangen, mit denen ihre Herkunftsrichtung nur äußerst grob bestimmt werden konnte. Ein Neutrinoteleskop sollte allerdings möglichst genaue Informationen über die Ursprungsrichtung liefern. Das Bild links unten zeigt das Prinzip, nach dem man energiereiche Neutrinos nachweisen kann. Ein Neutrino durchquert die Erde bis in die Nähe des Detektors, wo es – wenn man Glück hat! – auf einen Atomkern des umgebenden Materials prallt, also Gestein, Erdreich, Wasser oder Eis. Die Erde dient als Filter, der alle Teilchen außer den Neutrinos absorbiert. Um die Störsignale von kosmischen Teilchen, die von oben in den Detektor laufen, gering zu halten, muss ein Neutrinodetektor in großer Tiefe liegen: in einer Höhle, in tiefem Wasser oder in tiefem Eis.

Bei dem Stoß verwandelt sich das Neutrino häufig in ein geladenes Teilchen, zum Beispiel in ein Myon, einen schweren Verwandten des Elektrons. Das Myon übernimmt den größten Teil der Energie des Neutrinos und fliegt in annähernd gleicher Richtung weiter. Dabei zieht es einen Lichtkegel hinter sich her, vergleichbar mit dem Überschallkegel eines Düsenflugzeugs. Dieses schwache bläuliche Leuchten, Tscherenkow-Licht genannt, lässt sich mit empfindlichen Sensoren registrieren. Ein Neutrinoteleskop besteht aus vielen solcher Messeinheiten, die selbst ein einzelnes Lichtquant in elektrische Signale umwandeln: so genannte Fotovervielfacher.

Diese Detektoren werden in druckfeste Glaskugeln eingeschlossen, die gitterförmig ein großes Volumen überspannen. Sie registrieren Stärke und Ankunftszeit des Lichtblitzes. Aus den Zeitdaten, die auf wenige milliardstel Sekunden genau gemessen werden, kann man bestimmen, woher die Neutrinos kamen. Ein Computer vergleicht, wann die Blitze von verschiedenen Fotovervielfachern registriert wurden, und berechnet die Lage des Lichtkegels im Raum. ▷



MARKUS ACKERMANN, DESY

Rund 4300 Neutrinos in fünf Jahren: Diese Karte des Nordhimmels zeigt die Ursprungsrichtungen der vom Neutrinoteleskop Amanda dort registrierten Elementarteilchen.

▷ Daraus folgt die Bahn des Myons und aus dieser wiederum die Ursprungsrichtung des Neutrinos, im Fall von IceCube mit einer Genauigkeit von etwa einem Grad, also etwa zwei Vollmonddurchmessern. Aus der Stärke der Lichtblitze schließen die Forscher auf die Energie der Myonen.

Bereits in den 1980er Jahren wurde deutlich, dass Neutrinodetektoren in Tunneln oder Höhlen zu klein sind, um die schwachen Neutrinoflüsse von Supernova-Hüllen oder AGNs nachzuweisen. Damals erkannte man, dass Detektoren ein Volumen von zumindest einem hundertstel Kubikkilometer, vielleicht aber sogar einem ganzen Kubikkilometer aufweisen müssten. Einen solchen Detektor kann man zwar nicht mehr in einer Höhle unterbringen, dafür jedoch tief in offenem Wasser oder Eis.

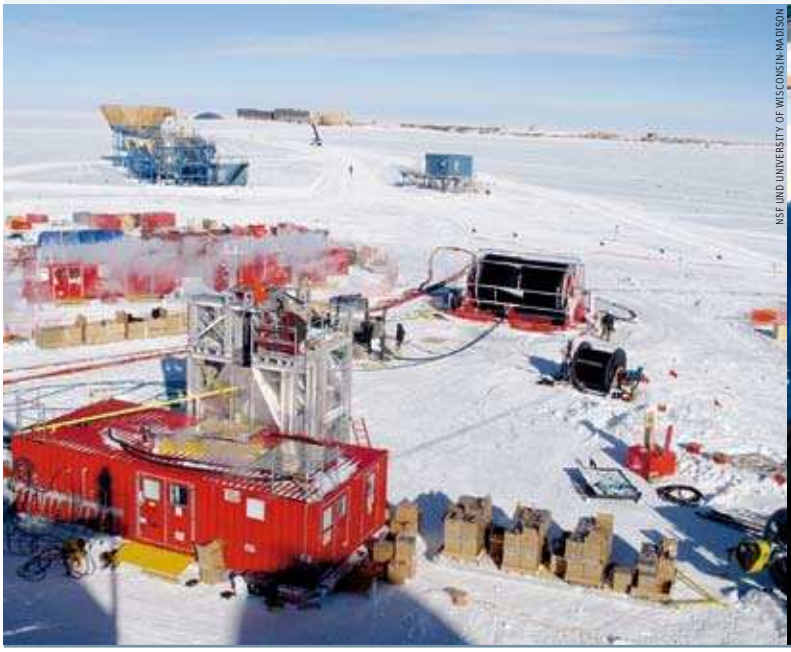
Nachdem ein in den 1970er Jahren begonnenes Projekt im Pazifik vor Hawaii gescheitert war, gelang es 1996 mit einem russisch-deutschen Experiment im sibirischen Baikalsee, eine Hand voll Neutrinos nachzuweisen – der Beweis, dass Unterwasserteleskope funktionieren. Auch unsere Gruppe aus dem Zeuthener Teilinstitut des Desy war daran beteiligt. Mit einer Höhe von 70 Metern und einem Durchmesser von 40 Metern war das Teleskop, das in einem Kilometer Tiefe im See schwebte, allerdings zu klein, um extraterrestrische Neutrinos nachweisen zu können. Sowohl die Richtungsverteilung als auch die Zahl der gemessenen Neutrinos vertrugen sich mit der Annahme, dass sie alle aus Stößen kosmischer Primärteilchen in der Erdatmosphäre stammten (siehe Grafik S. 45).

Eine wirkliche Erfolgschance sollte erst Amanda haben, das *Antarctic Myon And Neutrino Detection Array*, der Vorläufer von IceCube. Der vollständig ausgebaute Amanda-Detektor ist inzwischen seit sieben Jahren in Betrieb. Die Glaskugeln mit ihren Fotovervielfachern wurden nicht in Wasser herabgelassen, sondern am Südpol in den drei Kilometer dicken Eisschild der Antarktis versenkt. Wie später bei IceCube wurden die Löcher mit einem heißen Wasserstrahl in das Eis geschmolzen. Amanda besteht aus 677 Fotovervielfachern, die an 19 Trossen befestigt sind. Die meisten davon sind zwischen 1500 und 2000 Meter Tiefe innerhalb eines Zylinders mit zweihundert Meter Durchmesser angeordnet.

Die Idee, die Fotovervielfacher ins Eis der Antarktis zu versenken, stammt von Francis Halzen von der Universität Wisconsin in Madison. Amanda und IceCube verdanken ihre Existenz nicht zuletzt der US-amerikanischen Amundsen-Scott-Station am geografischen Südpol, die eine für antarktische Verhältnisse ex-

Wie man ein Teleskop im Eis versenkt

Die Bohranlage von IceCube besteht aus einem Heizkraftwerk und einem Pumpsystem, über das heißes Wasser in die Tiefe getrieben wird (links). Links im Hintergrund zu sehen ist hier ein Observatorium zur Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung und – am Horizont – die Amundsen-Scott-Station. Die kugelförmigen optischen Module enthalten die Fotovervielfacher; sie werden an Kabeltrossen in das aufgeschmolzene Bohrloch eingeführt (Mitte und rechts). Über die Kabel gelangen die Signale der Module später in das IceCube-Laboratory, wo sie archiviert und vorläufig ausgewertet werden.


NSF UND UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

DESY ZEUTHEN

zellente Infrastruktur zu Verfügung stellt. Montagearbeiten können im antarktischen Sommer – November bis Februar – durchgeführt werden. Aber auch im Winter ist die Station besetzt, sodass das Teleskop ganzjährig betrieben werden kann. Die geografische Position ergänzt die der anderen Projekte. Vom Südpol beobachtet man durch die Erde hindurch den Nordhimmel, die Projekte auf der Nordhalbkugel haben dagegen bevorzugt den Südhimmel im Blickfeld.

Nadeln im Heuhaufen

Zwar ist Eis etwas weniger transparent als Wasser, hat aber andere wichtige Vorteile. Erstens ist es stabil. Einmal eingefroren, bewegen sich die Glaskugeln nicht von der Stelle. Zweitens nützt die kalte Umgebung in der Tiefe der Kugeln (etwa –40 Grad Celsius) dem verlässlichen Betrieb von Fotovervielfachern und Elektronik. Und schließlich ist Eis ein steriles Medium, in dem weder Lebewesen noch der Zerfall radioaktiver Isotope Störlicht erzeugen.

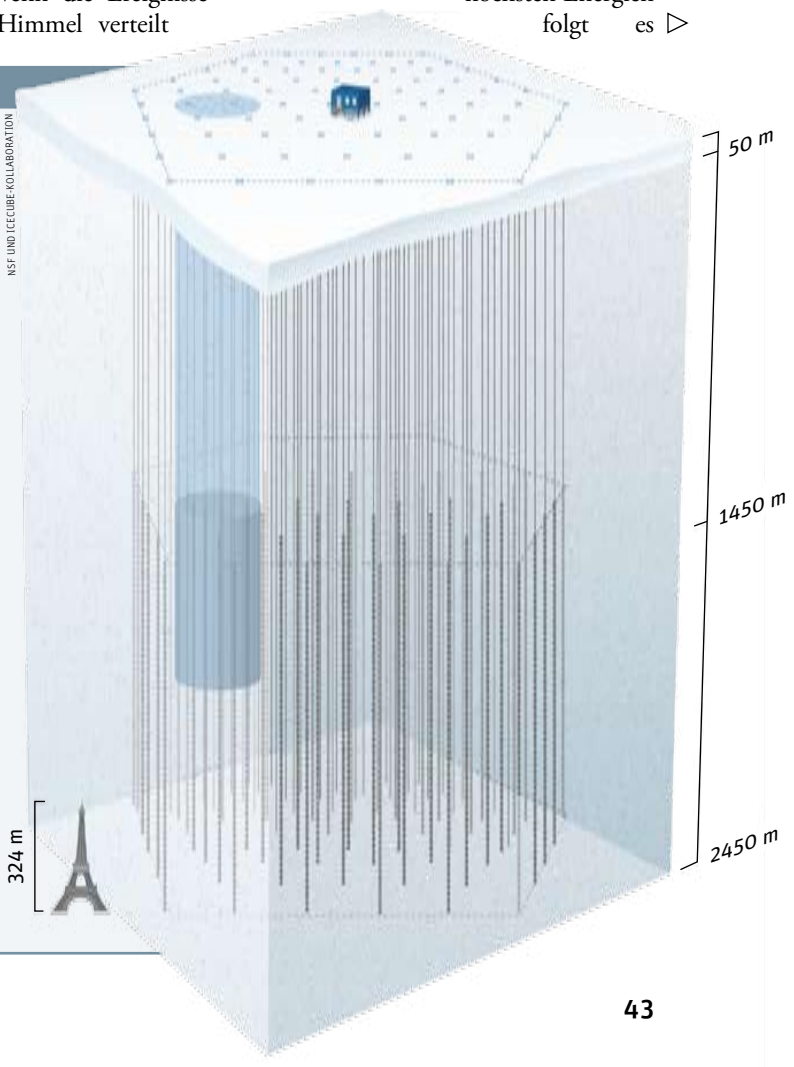
Aus den Milliarden von Spuren, die wir mit Amanda aufgezeichnet haben, konnten wir einige tausend aufwärtslaufende Spuren aus Neutrinoreaktionen herausfiltern. Die »Himmelskarte« dieser Ereignisse verrät, dass sich die Hoffnungen der Optimisten noch nicht erfüllt haben (Bild links oben). Über einem statistisch annähernd gleichmäßig verteilten Untergrund von Neutrinos, die wahrscheinlich fast alle in der Erdatmosphäre erzeugt worden sind, ist keinerlei punktförmige Anhäufung zu erkennen, wie man sie für eine einzelne extraterrestrische Quelle erwarten würde. Einige astrophysikalische Modelle, die hohe Neutrinoflüsse von AGNs vorhersagten, kann man darum bereits ausschließen.

Wenn man Beobachtungen interpretiert, die nur auf wenigen Neutrinoreaktionen beruhen, muss man Vorsicht walten lassen. Das illustriert eine zunächst viel versprechende Beobachtung von Neutrinos aus der Richtung einer aktiven Galaxie mit dem Namen ES1950+650. Über vier Jahre hinweg hatten wir fünf Neutrinos in einem Kreis mit einem Radius von 2,25 Grad um diese Quelle beobachtet – in guter Übereinstimmung mit den knapp vier atmosphärischen Neutrinos, die wir von dort erwarten würden, wenn die Ereignisse zufällig über den Himmel verteilt wären. Nichts Aufregendes, würde man denken.

Drei der fünf Neutrinos trafen jedoch innerhalb eines Zeitraums von nur 66 Tagen ein, und mehr noch: Zwei dieser drei fielen ziemlich genau mit Intensitätsmaxima der Gammastrahlung zusammen, die andere Astronomen für ES1950+650 registriert hatten. Das sah nach allem anderen als nach Zufall aus! Physiker sprechen in solchen Fällen allerdings erst dann von einer Entdeckung, wenn die Zufallswahrscheinlichkeit kleiner als ein Hunderttausendstel ist. Zwar ließ sich diese für unsere Beobachtungen nicht exakt angeben, sie betrug jedoch wohl eher ein Prozent als ein Hunderttausendstel. Nach sorgfältiger Analyse war darum klar, dass wir unsere Hoffnungen auf eine Entdeckung vorerst begraben mussten.

Auch im Energiespektrum der bislang gemessenen Neutrinos ließ sich kein Hinweis auf einen extraterrestrischen Anteil aufspüren. Zwar erstreckt es sich bis 100 TeV, fast hundertmal höher, als jemals mit unterirdischen Detektoren gemessen werden konnte, aber selbst bei höchsten Energien folgt es ▷

DESY ZEUTHEN



NSF UND ICECUBE-KOLLABORATION

Schema von IceCube und IceTop (ganz rechts). Der dunkle Zylinder markiert die Lage des Teleskops Amanda, das in IceCube integriert ist. Wenn IceCube im Jahr 2011 fertig gestellt ist, soll es 4800 optische Module an 80 Kabeltrossen umfassen. Es wird weltweit das größte und empfindlichste Neutrinoteleskop sein.

▷ dem Verlauf, den man für Neutrinos aus der Erdatmosphäre erwartet. Extraterrestrische Neutrinos sollten bei hohen Energien vermehrt auftreten. Auch wenn sie nicht aus wenigen starken Quellen stammen sollten, die sich in einer Himmelskarte hervorheben, sondern aus vielen schwachen Quellen: Sie sollten sich zu einem Überschuss bei hohen Energien summieren. Da dies nicht beobachtet wurde, scheiden bestimmte Modelle auf Grund zu hoher Flussvorhersagen aus.

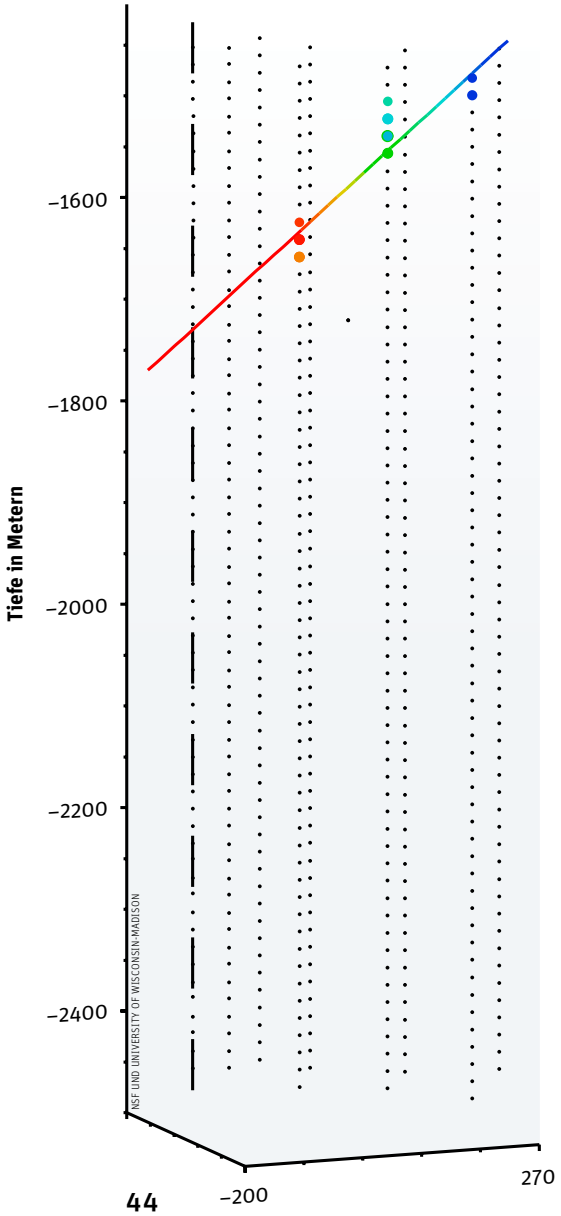
Amanda hat ein Volumen von 0,016 Kubikkilometern – die eindeutige Identifizierung einer Quelle wäre da eher ein Glücksfall gewesen. Tatsächlich war Amanda schon immer als Vorstufe zu einem kubikkilometergroßen Teleskop gedacht: IceCube.

Seitdem die erste Trosse von IceCube im Januar 2005 installiert wurde, sind weitere 21 Trossen hinzugekommen – acht in der Saison 2005/06 und 13 in der Saison 2006/07. Längst haben wir die Bohrgeschwindigkeit der ersten Saison überboten. In den kommenden Jahren werden wir darum 15 bis 16 Trossen pro Saison installieren können. Wenn IceCube im Januar 2011 schließlich fertig gestellt sein wird, soll es 80 Trossen mit insgesamt 4800 Kugeln umfassen, den »optischen Modulen«.

Jedes dieser Elemente misst im Durchmesser 32 Zentimeter. Ihr Fotovervielfacher sammelt fast 40 Prozent mehr Tscherenkow-Licht ein als der von Amanda. Während die Module von Amanda im Wesentlichen nur einen Lichtdetektor umschließen, enthalten diejenigen von IceCube zusätzlich eine aufwändige Elektronik. Deren wichtigste Aufgabe besteht darin, das analoge Signal zu digitalisieren, also in eine Zahlenfolge umzuwandeln, die Stärke und zeitlichen Verlauf des Signals verschlüsselt. Die notwendige Zeitgenauigkeit von wenigen Nanosekunden stellte die Entwickler vor große Herausforderungen. Die Fronten von Signalen, die kilometerlang durch ein Kupferkabel laufen, verschmieren nämlich auf über 100 Nanosekunden. Dass die Zeitunschärfe der Signale mit der neuen Elektronik nur drei Nanosekunden beträgt, ist deshalb ein wichtiger Erfolg.

Die Daten werden mit bis zu zwei Megabit pro Sekunde von jedem Modul aus der Tiefe an die Oberfläche geschickt und laufen im IceCube Laboratory (ICL) zusammen, einem zweistöckigen, hermetisch isolierten Gebäude. Wie auch das riesige Hauptgebäude der Südpolstation steht das ICL auf Stelzen. Damit soll vermieden werden, dass der Treibschnee entlang den Wänden Schneewehen bildet und schließlich das Gebäude begräbt.

Im ICL werden die Signale von einer Empfangselektronik aufgenommen und an ein leistungsfähiges Computersystem weitergeleitet. Hier werden die vielen Einzelsignale zu »Ereignissen« zusammengefügt, zu Signalgruppen also, die zeitlich zusammenpassen und von ein und derselben Teilchenreaktion stammen könnten. Aus den Ankunftszeiten wird dann die Richtung rekonstruiert. Wenn die Spur von unten zu kommen scheint, hat man einen Neutrinokandidaten, der am gleichen Tag über Satellit auf die Nordhalbkugel übertragen wird. 90 Prozent der Daten werden allerdings auf Magnetbänder geschrieben, die später ausgeflogen werden.



Dieses von IceCube registrierte Neutrinoereignis zeigt die Spuren eines Myons, dessen Tscherenkow-Strahlung von unten nach oben die Anlage passierte und dabei von Fotovervielfachern an drei Trossen nachgewiesen wurde.

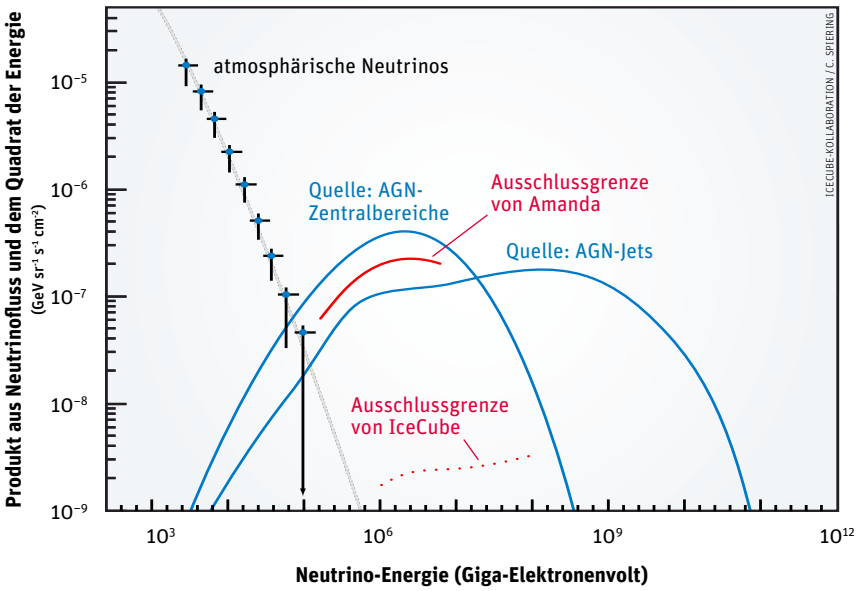
Ein Deckel für IceCube

IceCube wird ergänzt durch IceTop, eine Oberflächen-Anordnung zum Nachweis so genannter Luftschauer. IceTop besteht aus eisgefüllten Tanks mit jeweils zwei Meter Durchmesser, die über einen Quadratkilometer der Eisoberfläche verteilt sind. In jedem Tank sind zwei Glaskugeln mit Fotovervielfachern eingefroren. Sie registrieren das Tscherenkow-Licht von Teilchen, die aus Luftschauern stammen – ausgelöst durch Stöße energiereicher Protonen oder Kerne hoch in der Atmosphäre. Kombiniert man Messwerte von IceTop und IceCube, so kann man außer der Richtung und der Energie des Schauers auch abschätzen, ob das eingetroffene Teilchen leicht oder schwer war.

Wir können also bestimmen, ob es eher ein Proton oder ein Kern mittlerer Masse wie Kohlenstoff oder Sauerstoff oder ein schwerer Kern wie Eisen war. Verschiedene Entstehungsszenarien der kosmischen Strahlung sagen unterschiedliche Verhältnisse der darin enthaltenen chemischen Elemente voraus, und deshalb ist das eine wichtige Information.

Ein so ehrgeiziges Projekt lässt sich nur in internationaler Kooperation verwirklichen. Die Amundsen-Scott-Station am Südpol, die von der US-amerikanischen National Science Foundation (NSF) betrieben wird, stellt dabei die Logistik bereit. Für den Bau von IceCube hat der US-Kongress der NSF einen Zusatzhaushalt von 240 Millionen US-Dollar genehmigt. Den Großteil der Restkosten – etwa 30 Millionen US-Dollar – teilen sich Deutschland, Schweden und Belgien, die alle bereits an Amanda beteiligt waren. Neue IceCube-Teilnehmer sind Neuseeland, die Niederlande, England und Japan. Neuseeland hat dabei eine geografische Schlüsselposition inne. Die Stadt Christchurch auf der Südinsel Neuseelands beherbergt das International Antarctic Center, von dem aus die amerikanischen Hercules-

2013 wissen wir es genauer: Entstehen Neutrinos in den Jets Aktiver Galaktischer Kerne (AGNs)? Die vorliegenden Daten widersprechen einem Modell, das die AGN-Zentralbereiche als Neutrinoquelle annimmt (obere blaue Linie). Mit der Annahme, dass die registrierten Teilchenflüsse (blaue Punkte mit Fehlerbalken) ausschließlich aus atmosphärischen Wechselwirkungen stammen, sind sie aber verträglich. Amanda registriert jedoch nur Flüsse oberhalb der eingezeichneten Ausschlussgrenze (durchgezogene rote Linie). IceCube hingegen wird auch schwächere Teilchenflüsse messen (ab 2013 sogar bis herab zur gepunkteten roten Linie) und damit ein Modell prüfen können (untere blaue Linie), das die Entstehung von Neutrinos in den Jets der AGNs annimmt.



Transportflugzeuge zur Antarktis aufbrechen. Sie transportieren Menschen und Material nach McMurdo, der US-amerikanischen Station am Rand des kalten Kontinents. Von dort fliegt man dann in einer zweiten Etappe die restlichen 1400 Kilometer zum Südpol.

Auch die optischen Module gelangen auf diesem Weg dorthin. Sie werden in Madison (Wisconsin), Zeuthen (Deutschland) sowie Stockholm und Uppsala (Schweden) zusammengesetzt, getestet und dann nach Christchurch gebracht. Alle installierten Module arbeiten präzise, woher sie auch stammen. Bleibt die Ausfallrate so gering wie bisher, werden auch nach 15 Jahren noch über 95 Prozent von ihnen funktionieren.

Auch alle anderen Aufgaben sind auf die Kooperationspartner verteilt. Dazu gehört, den Detektor zu überwachen, Software zu schreiben, aufwändige Simulationsrechnungen durchzuführen und die Daten auszuwerten. So stellt zum Beispiel das Desy in Zeuthen mit einer leistungsfähigen Rechnerfarm das europäische Datenzentrum zur Verfügung. Die Koordination des Gesamtprojekts liegt in den Händen der Universität von Wisconsin in Madison.

IceCube wird tausendmal so groß sein wie die größten unterirdischen Neutrinodetektoren. Darum ist auch die Erwartung hoch, dass ihm die Entdeckung von Neutrinos aus kosmischen Beschleunigern gelingt. Die Frage, ob Gammastrahlenausbrüche die kosmischen Strahlen höchster Energie erzeugen, könnte schon nach einer Laufzeit von ein bis zwei Jahren beantwortet werden.

Vielleicht werden aber auch ganz andere Beobachtungen von IceCube im Nachhinein als die wichtigsten gelten. Dazu könnten Hinweise auf die Dunkle Materie zählen. Sie tritt nur schwach mit der normalen Materie aus Atomkernen und Elektronen in Wechselwirkung, ähnlich wie die Neutrinos. Ihre Bestandteile scheinen im Vergleich zu den Neutrinos jedoch sehr schwer zu sein. Darum nennt man die entsprechenden Teilchen auch Wimps *(Weakly Interacting Massive Particles)*.

Auf Grund ihrer Masse könnten sie von der Schwerkraft großer Himmelskörper wie etwa der Sonne eingefangen werden. Dort könnten sie sich in einem dichten Schwarm ansammeln. Stoßen zwei Wimps zusammen, könnten sie in zwei Bündel normaler Elementarteilchen zerstrahlen, darunter auch Neutrinos. Besteht die Dunkle Materie aus Wimps, dann müsste man gelegentlich eines der Zerfallsneutrinos aus der Richtung der Sonne beobachten.

Diese Teilchen müssen energiereicher sein als diejenigen, die bei den Fusionsprozessen im Zentrum der Sonne frei werden. Weder das Baikal-Teleskop noch Amanda haben einen derartigen Überschuss von der Sonne oder aus dem Erdzentrum registriert. IceCube wird die Suche nach den Wimps mit dreißigfacher Empfindlichkeit fortsetzen.

Besonders spektakulär wäre es, eine Sternexplosion in der Nähe zu beobachten. Eine Supernova im Zentralbereich unserer Milchstraße würde IceCube mit 10^{20} Neutrinos im Mega-Elektronenvolt-Bereich bombardieren, die den Detektor innerhalb von wenigen Sekunden durchqueren. In einem solchen Fall rechnen wir damit, eine Million Reaktionen nachweisen zu können. Allerdings brauchen wir dafür Geduld: Nur alle 30 bis 50 Jahre dürfte es zu einem solchen Ereignis kommen. ◁

Nach seiner Promotion an der Berliner Humboldt-Universität und einem Aufenthalt am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (Russland) arbeitet **Christian Spiering** am Desy-Teilinstitut in Zeuthen bei Berlin. Von 1997 bis 2005 war er wissenschaftlicher Koordinator des europäischen Teils von Amanda und von 2005 bis 2007 wissenschaftlicher Koordinator der internationalen IceCube-Kollaboration.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Neutrinojagd im tiefsten See der Erde. Von Christian Spiering in: Humboldts Erben. Von Gisela Graichen (Hg.). Lübbe-Verlag, 2000

Astroteilchenphysik. Von Claus Grupen. Springer-Verlag, 2000.

Raumschiff Neutrino – Die Geschichte eines Elementarteilchens. Von Christine Sutton. Birkhäuser-Verlag, 1994

Neutrino astrophysics: A new tool for exploring the universe. Von Eli Waxman in: Science, Bd. 315, S. 63, 2007

Neutrino astrophysics experiments beneath the sea and ice. Von Francis Halzen in: Science, Bd. 315, S. 66, 2007

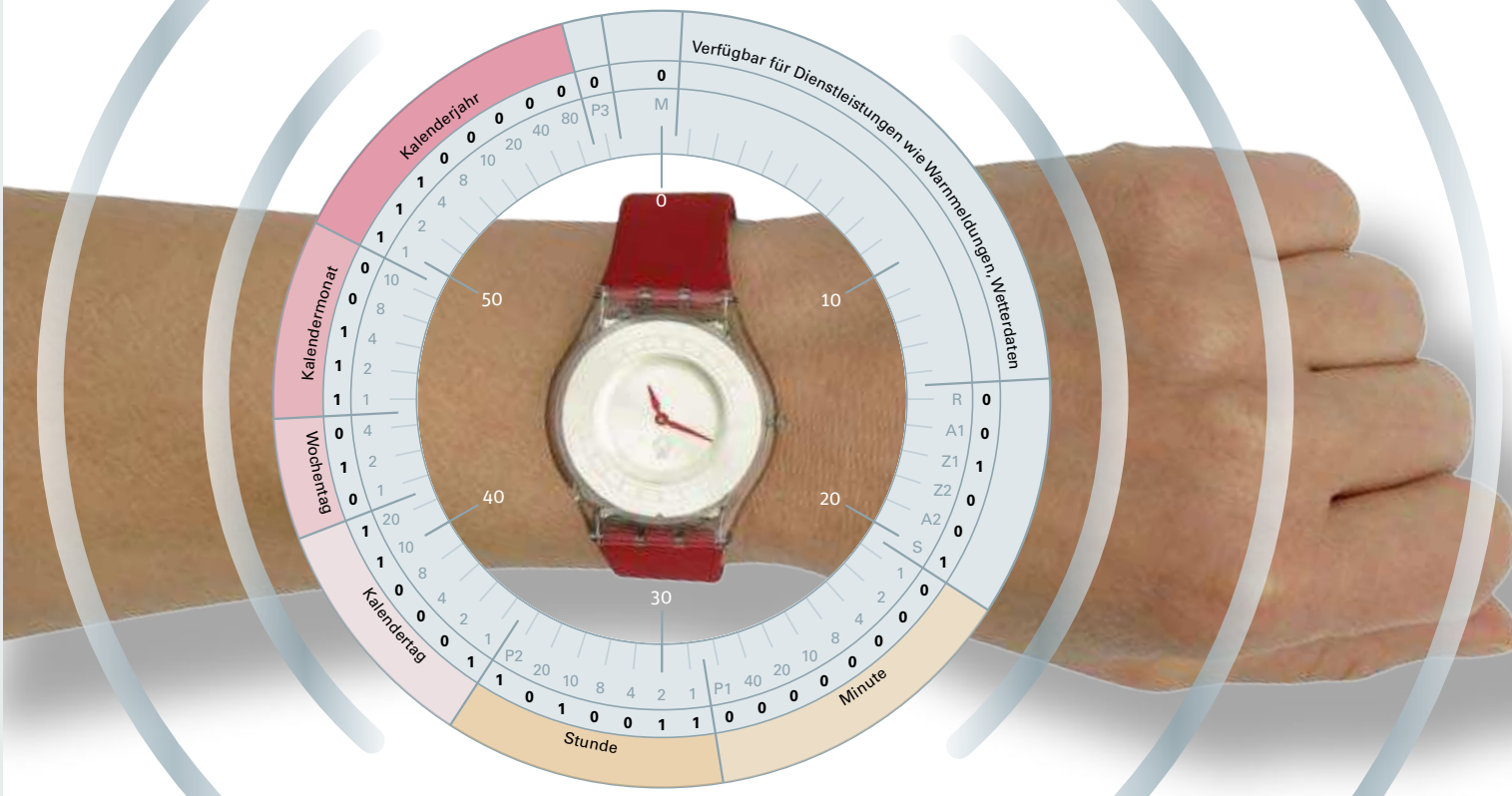
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893101.

Hören Sie dazu auch unseren **Podcast** unter www.spektrum.de/talk.

FUNKUHREN

Atomzeit am Handgelenk

Funkuhren wissen, was das Cäsium geschlagen hat.



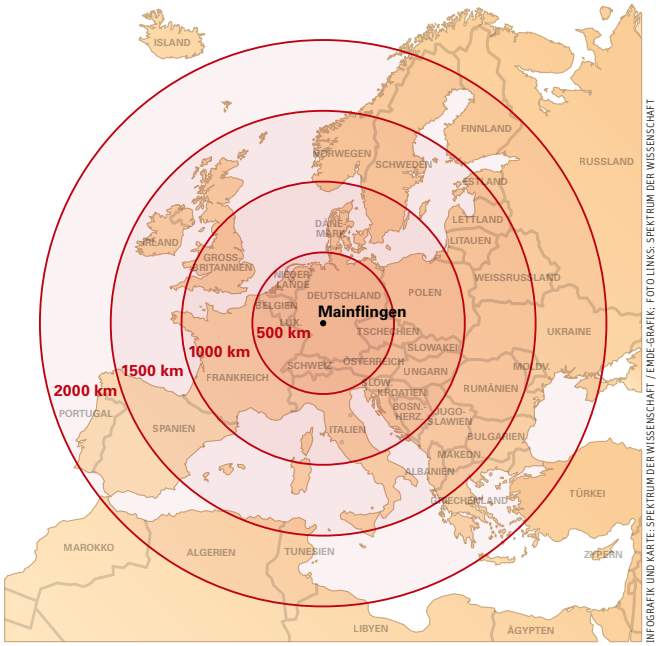
WUSSTEN SIE SCHON?

Wolfgang Hilberg gilt als Erfinder der Funkuhr. Er arbeitete bei Telefunken in einem Entwicklungsteam für Digitalrechner. Weil er sich über seine schlecht gehende Wohnzimmeruhr ärgerte, kam er auf die Idee, die Zeit über Funk zentral zu steuern. 1967 erhielt er zwar ein Patent, die erste Funkuhr kam aber erst 1985 auf den Markt, als es erloschen war. Die Idee, mit Radiowellen Zeitsignale zu übertragen, ist jedoch älter. Der britische Ingenieur Sir Howard Grubb prophezeite solche Anwendungen angesichts der Experimente Guglielmo Marconis, der 1899 eine Funkverbindung über den Ärmelkanal realisierte: »Unzweifelhaft wird es möglich sein, dass unsere Uhren automatisch von elektrischen Wellen gestellt werden, während wir durch die Straßen gehen.«

Der Tag ist das für den Menschen natürliche Zeitmass, deshalb bestimmte man früher die Sekunde als den 24 x 60 x 60ten = 86 400ten Teil des mittleren Sonnentags. Doch astronomische Beobachtungen zeigten, dass die Erde über die Jahrtausende immer langsamer rotiert. Grund dafür ist vor allem die Gezeitenreibung. Auch schwankt die Länge eines Tags, weil sich im Erdkörper Massen verlagern. Daher nutzt man seit 1967 das Element Cäsium zur Festlegung einer Sekunde: Sie entspricht dem 9 192 631 770-Fachen der Periodendauer jener Strahlung, die Cäsium-133-Atome freisetzen, wenn sie zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus ihres Grundzustands wechseln.

Schaltsekunden: Das internationale Büro für Maß und Gewicht in Paris ist dafür verantwortlich, die einheitliche Grundlage für die Zeitbestimmung, genannt UTC (Universal Time Coordinated), weltweit zu verbreiten. Das Büro gleicht unter Mitwirkung von fünfzig Instituten, darunter auch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, die Atomzeit immer wieder an die tatsächlich abgelaufene unregelmäßige Erdrotation an, da sich unser natürliches Zeitempfinden nach dem Sonnenstand orientiert. Zu diesem Zweck werden in der Mitte oder am Ende eines Jahres Schaltsekunden eingefügt, etwa in der Nacht zum 1. Januar 2006. Der Zeit 00:59h 59s folgte also 00:59h 60s und dann erst 01:00h 00s. Ende 2007 wird es vermutlich wieder eine Schaltsekunde geben.

Ein Datenwort des binären DCF77-Kodes umfasst sechzig Sekunden, jede davon repräsentiert ein Bit. Gemäß dem BCD-Standard würde etwa die Angabe des Erstverkaufstags dieser Spektrum-Ausgabe »Dienstag, 31. Juli 2007« sowie »13:00 Uhr Mitteleuropäischer Sommerzeit« wie nebenstehend dargestellt übertragen. Einige Bits haben Sonderfunktionen. So kündigt das Bit S den Start der eigentlichen Zeitinformation an, während A1 und A2 auf das bevorstehende Einfügen einer Schaltsekunde hinweisen. Die Zeitzonenbits Z1 und Z2 kodieren wie hier angegeben die Sommerzeit »MESZ«. Die Prüfbits P1 – 3 ergänzen den jeweils vorhergehenden Informationsabschnitt auf eine gerade Anzahl von Einsen – eine Möglichkeit, fehlerhafte Datenübertragungen zu erkennen.



INFOGRAFIK UND KARTE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; FOTO LINKS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der Langwellensender DCF77 sendet für ganz Deutschland die gesetzliche Zeit. Aber die Signale können noch weit darüber hinaus empfangen werden.

Von Bernhard Gerl

Vor knapp vierzig Jahren wurde die Zeit in Deutschland Chefsache: Per Gesetz beauftragte die Regierung die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig (PTB), den Bürgern mitzuteilen, wie spät es ist. Zehn Atomuhren liefern diese Information im Verein mit Präzisionszeitmessern weltweit. Im Lauf eines Jahres weicht die genaueste der PTB-Uhren höchstens eine millionstel Sekunde von der Zeit einer idealen Uhr ab.

Eine Quarzarmbanduhr hingegen irrt sich jeden Monat um einige Sekunden. Mechanische Uhren leisten sich noch mehr Unpünktlichkeit: Den Begriff »Chronometer« führen zu dürfen erfordert eine Genauigkeit von minus vier bis plus sechs Sekunden pro Tag. Auf die Sekunde verlässlich sind deshalb Funkuhren, denn sie erfahren die korrekte Zeit von der PTB und stellen sich entsprechend nach, je nach Stromversorgung jede Stunde oder einmal am Tag.

Die korrekte Zeit empfangen sie als kodiertes elektromagnetisches Signal. Dazu wird in das Uhrengehäuse eine Ferritantenne eingebaut, das gilt auch für den Zeitmesser am Handgelenk (bei der ersten Funkarmbanduhr, der Junghans Mega 1, bestand die Antenne noch aus einem Metallstreifen im Armband). Sie empfängt das Zeitsignal des Senders DCF77 auf der Frequenz 77,5 Kilohertz (Wellenlänge: 3868,29 Meter). Diese Langwellen breiten sich vom Sender in Mainflingen bei Hanau insgesamt etwa 2000 Kilometer weit aus: die ersten 600 Kilometer überwiegend entlang der Erdoberfläche, zu weiter entfernten Orten über die so genannte Raumwelle: In die Höhe abgestrahlte Wellen werden von der elektrisch leitenden Ionosphäre wieder zur Erde reflektiert.

Die Zeitinformation wird binär, also mit Nullen und Einsen kodiert übertragen, allerdings mit nur einem Bit pro Sekunde (im Vergleich etwa zu einem milliardenfach schnelleren DSL-Anschluss). Auch der verwendete binäre Kode erscheint antiquiert: Entsprechend den Anforderungen der Industrie Mitte der 1970er Jahre werden die Stellen einer Dezimalzahl einzeln in das duale System übertragen. Ein Beispiel: Eine Stundenangabe »13« – ein Uhr nachmittags – ließe sich mit vier Bits als Dualzahl »1101« darstellen, wird aber dennoch mit sechs Bits kodiert, vier für die letzte Ziffer (0 – 9), zwei für die erste (0 – 2).

Für Uhrzeit- und Datumsangabe werden deshalb insgesamt 35 Bits benötigt. Hinzu kommen Informationen, ob ein Wechsel von der Mitteleuropäischen Zeit in die Sommerzeit vorzunehmen ist beziehungsweise umgekehrt oder ob Schaltsekunden einzufügen sind. Insgesamt umfasst ein Datenwort 59 Bits.

Jeweils am Anfang einer Sekunde wird die Amplitude des Signals auf ein Viertel des Maximalwerts reduziert. Auf diese Weise grenzt man die Bits voneinander ab. Die Dauer der Absenkung enthält die wesentliche Information: 100 Millisekunden setzen das Bit auf den Wert »0«, 200 Millisekunden stehen für die »1«. Die 59te Sekunde markiert das Ende eines Datenworts durch eine konstante Signalamplitude. So robust diese Technik auch ist, je nach Qualität des Empfangssystems wird der Beginn eines Bits dennoch mit einer Ungenauigkeit von 0,1 bis 100 Millisekunden erkannt.

Für bislang ungenutzte Stellen gibt es bereits Pläne: Die in den Sekunden 1 bis 14 übertragenen Bits könnten in Zukunft vom Bundesamt für Bevölkerungswarnung und Katastrophenhilfe für Warnungen etwa vor Chemieunfällen oder Stürmen genutzt werden. Hierzu wurden erste Tests durchgeführt. Zusätzlich übermittelt die Schweizer Firma Meteo Time seit Ende 2006 mit DCF77 und dem Schweizer Zeitzeichensender HBG (75 Kilohertz) auf diesen Bits Wetterdaten. Allerdings ist derzeit noch keine entsprechende Armbanduhr erhältlich. Wenn unsere persönlichen Chronometer aber eines Tages nicht nur die Zeit, sondern auch die Wettervorhersage empfangen können, werden wir nicht nur pünktlich, sondern auch passend angezogen zu unseren Terminen erscheinen.

Bernhard Gerl ist Technikpublizist in Mainz.

»Die Dunkle Energie gefährdet die Kultur der astronomischen Forschung«

In mehreren Großprojekten wollen Teilchenphysiker und Astronomen gemeinsam die so genannte Dunkle Energie vermessen, die drei Viertel der Energiedichte des Kosmos ausmacht und seine Ausdehnung beschleunigt. **Simon White**, Direktor am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, warnt seine Kollegen, dafür unbedacht den Arbeitsstil der Hochenergiephysik zu übernehmen.

Auch wenn sie sich für die Teilchenphysik als bedeutsam erweisen kann, sprechen für die Existenz der Dunklen Energie allein astronomische Beobachtungen. Bisherigen Messungen zufolge könnte es sich um die kosmologische Konstante handeln, einen Term, den Albert Einstein 1917 in die Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie einfügte. Das schien ihm notwendig, um aus dieser Theorie ein statisches Weltmodell abzuleiten, was damals als selbstverständlich galt. Als Ende der 1920er Jahre die Expansion des Weltalls entdeckt wurde, bedauerte Einstein seinen Schritt. Andere Kandidaten sehen Theoretiker in Abwandlungen von Einsteins Theorie, gänzlich neuen Gravitationstheorien, höheren Raumdimensionen oder so genannten Skalarfeldern, die man als eine bislang unbekannte Teilchenart deuten kann.

Zu den geplanten Projekten gehört der Dark Energy Survey, der in 500 Nächten mit dem 4-Meter-Teleskop auf dem Cerro Tololo (Chile) unter anderem die Entfernungen von Tausenden von Supernovae und Millionen von Galaxien messen soll. Mehr als 100 Wissenschaftler aus 21 Instituten in den USA, Großbritannien, Spanien und Brasilien sind daran beteiligt. Auch neue Satelliten werden vorbereitet, darunter JDEM *(Joint Dark Energy Mission)*, ein Unternehmen von Nasa und US-amerikanischem Energieministerium. Keines dieser Projekte kritisiert White direkt, er sorgt sich vielmehr um langfristige Entwicklungen der Forschungslandschaft.

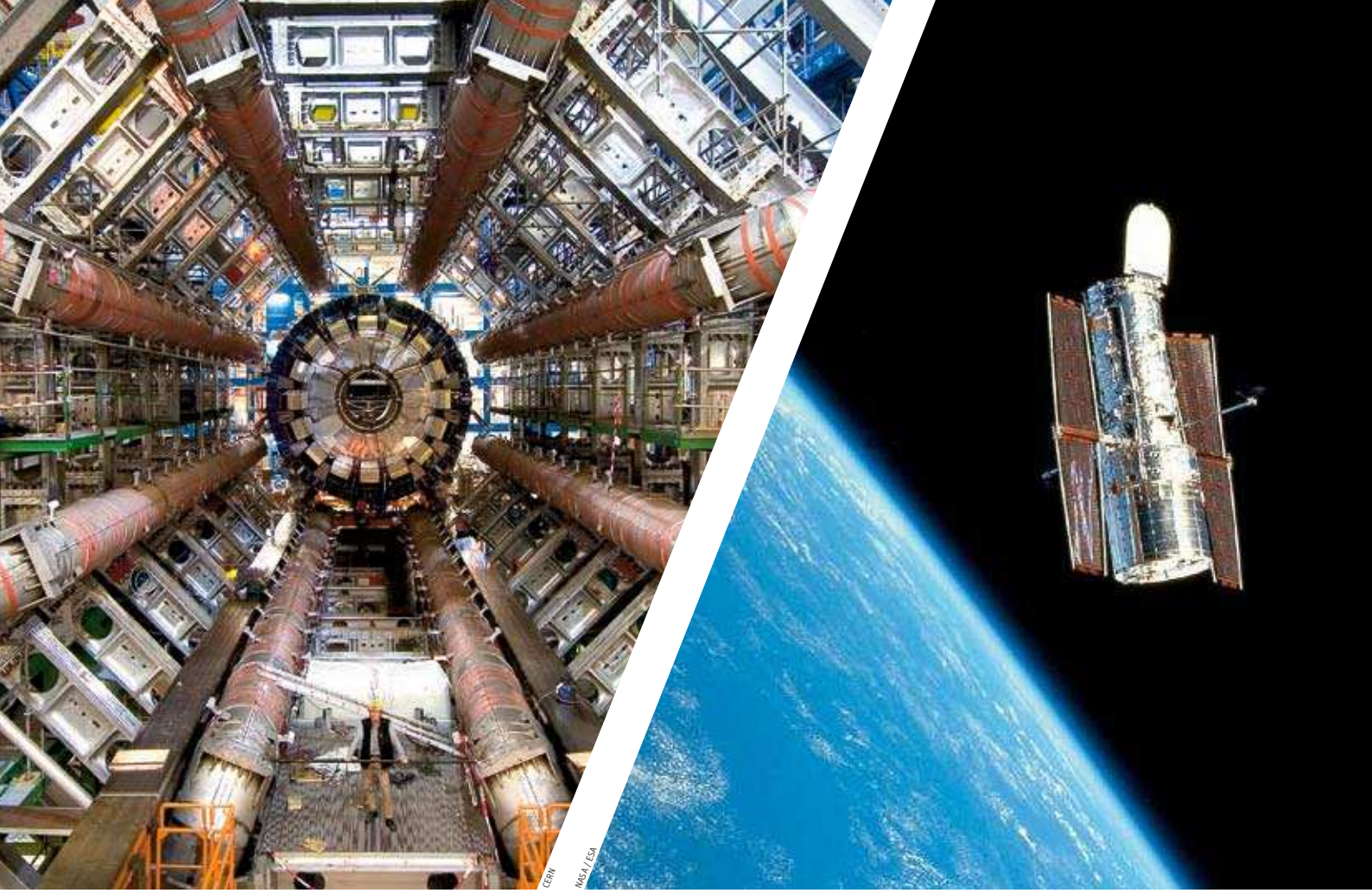
»Astronomische Beobachtungen lassen sich nicht wie ein physikalisches Experiment kontrollieren«

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor White, wie kann man die Eigenschaften der Dunklen Energie genauer bestimmen?

White: Prinzipiell kann man mit astronomischen Techniken zwei Funktionen messen, die aufschlussreich sind. Das eine ist die Expansionsgeschichte des Universums. Sie beschreibt, wie es im Lauf der Zeit größer wurde. Die andere ist die Variation der Materiedichte von Ort zu Ort. Dieser so genannte Dichtekontrast vergrößert sich durch die anziehende Wirkung der Gravitation, doch die abstoßende Dunkle Energie wirkt dem entgegen. Aus der kosmischen Hintergrundstrahlung lesen wir ab, dass die Materie kurz nach dem Urknall recht gleichförmig verteilt war. Seitdem sind die Dichtekontraste angewachsen und haben die Strukturen hervorgebracht, die wir heute beobachten.

Spektrum: Hängen diese Funktionen miteinander zusammen?

White: Wenn Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation richtig be-



Flagschiffe zweier Forschungskulturen: der Large Hadron Collider (links) und das Weltraumteleskop Hubble (rechts).

schreibt, folgt die eine Funktion aus der anderen. Wenn wir beide Funktionen separat messen, können wir sie vergleichen und so die Allgemeine Relativitätstheorie prüfen. Passen sie zueinander, scheint diese Theorie zu stimmen. Falls nicht, müssen wir sie zumindest modifizieren. Das ist der erste Schritt.

Spektrum: Und wie geht es weiter?

White: Gilt Einsteins Theorie, so können wir aus der Expansionsgeschichte erkennen, wie sich die Dunkle Energie im Lauf der Zeit entwickelt hat. Handelt es sich dabei um Einsteins kosmologische Konstante, muss sie zeitlich unverändert bleiben. Ist sie etwas anderes, könnte sie sich verändern, und das Ziel wäre dann, die Änderungsrate zu messen. Allerdings betrachten selbst führende Theoretiker die unterschiedlichen Theorien, die eine Änderung vorhersagen, als Versuche, die überraschende Entdeckung der Dunklen Energie ad hoc wiederzugeben, ohne dass die Physik dadurch wirklich verstanden wäre.

Spektrum: Was könnten die neuen Projekte ergeben?

White: Schon jetzt wissen wir aus anderen Beobachtungen, dass sich die Dunkle Energie in den letzten zwei Dritteln der Weltgeschichte nicht beträchtlich verändert hat. Die Beobachtungen sind mit der kosmologischen Konstante vereinbar, wobei es eine gewisse Unsicherheit gibt. Theoretiker charakterisieren die Dunkle Energie mit dem Zustandsparameter w. Handelt es sich um Einsteins kosmologische Konstante, so gilt für alle Zeiten $w = -1$. Bisherigen Messungen zufolge ist $w = -1{,}0 \pm 0{,}1$ und demnach schon jetzt bis auf 10 Prozent genau bekannt. Die neuen Großprojekte sollen w bis auf ein oder zwei Prozent bestimmen. Vielleicht finden sie heraus, dass $w = -1{,}00$ beträgt oder $w = -0{,}90$, jeweils mit einem Fehler von ein bis zwei Prozent. Das erste Ergebnis hätte kaum etwas Neues gebracht. Nur im letzteren Fall hätten wir wirklich etwas Wichtiges gelernt, denn die kosmologische Konstante scheidet dann aus.

Spektrum: Lässt sich mit astronomischen Beobachtungen die nötige Präzision erreichen?

White: Das hängt von Faktoren ab, welche die Teilchenphysiker ohne Erfahrungen im Umgang mit astronomischen Daten nicht richtig einschätzen können. Sie denken nur an die statistischen Fehler, übersehen jedoch, dass systematische Unsicherheiten kritisch sind, weil wir die Physik der entfernten Objekte einfach nicht genau genug kennen und sie nicht wie in einem Experiment kontrollieren können. Ob das eine Rolle spielt, werden wir erst wissen, wenn die Durchmusterungen abgeschlossen sind. Mag sein, dass es gelingt, den Parameter w genauer anzugeben. Vielleicht wissen wir dann aber nur, dass die beobachteten astronomischen Objekte komplizierter sind, als wir vorher dachten.

Spektrum: Hat man nicht in beiden Fällen etwas Neues gelernt?

White: Doch, schon. Die Frage ist bloß, ob wir bereit sind, einige hundert Milli- ▷

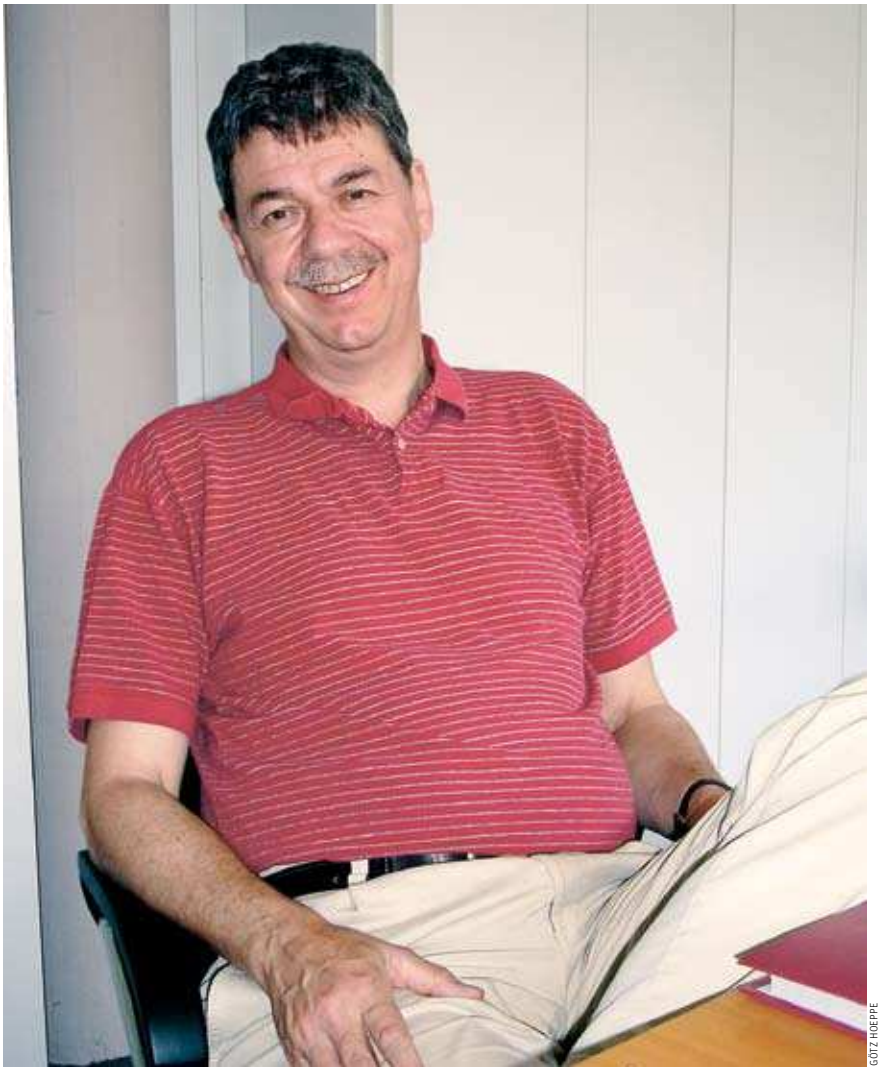
▷ onen Dollar auszugeben, um Neues über so etwas Spezielles wie Supernovae vom Typ Ia zu erfahren! Wenn man sehr viele ferne Supernovae beobachtet, um etwas über die Dunkle Energie zu erfahren, entdecken wir vielleicht, dass diese Sternexplosionen einander sehr ähneln, obwohl sie unterschiedlich weit entfernt sind. Dann taugen sie als so genannte Standardkerzen und wir haben das Glück, dass wir den Parameter *w* genauer bestimmen können. Wir könnten aber auch herausfinden, dass die Helligkeit der Supernovae im Lauf der kosmischen Geschichte auf ungewisse Weise variiert. Dann haben wir Pech gehabt und viel Geld für ein Ergebnis investiert, das nur Spezialisten interessiert. Die Frage ist einfach, wofür wir unser Geld ausgeben.

Spektrum: Anfang 2003 wurden die ersten Ergebnisse des Satelliten WMAP veröffentlicht, der das Muster der kosmischen Hintergrundstrahlung so genau wie nie zuvor vermaß – und deutliche Hinweise auf die Existenz der Dunklen Energie lieferte. Für die Zeitschrift »Science« war das damals der wissenschaftliche Durchbruch des Jahres. Lassen sich die Teilchenphysiker von diesem Erfolg blenden?

White: Diese Physiker sind es gewohnt, ihre Experimente genau zu kontrollieren. Die kosmische Hintergrundstrahlung passt in diese Vorstellung, denn auch wenn sie so kurz nach dem Urknall freigesetzt wurde, können wir ihre physikalischen Grundlagen ziemlich genau verstehen, weil das Universum damals noch weit gehend gleichförmig war. Noch bevor man das Muster dieser Strahlung am Himmel gemessen hatte, konnte man seine statistischen Eigenschaften vorhersagen. Die Beobachtungen bestätigten das, und man konnte so das Alter des Universums sowie seine Materie- und Energiedichte angeben. Das war natürlich eindrucksvoll. Dies ist jedoch bislang das einzige Beispiel, bei dem die Astronomie schlagartig so präzise Ergebnisse lieferte.

Spektrum: Sie warnen vor der Bedrohung der »Kultur der Astronomie« durch die neuen Großprojekte. Was meinen Sie damit?

White: Mit Großprojekten wie denen zur Dunklen Energie werden die Astronomen mit einer fremden Arbeitskultur konfrontiert, und das schafft Probleme. Viele wissenschaftliche Unternehmungen wachsen und werden immer komplexer. Entscheidend ist dann, wie man sie



GÖTZ HOEPPE

strukturiert. Das ist eine Frage der Arbeitsteilung. Die Geschichte der menschlichen Zivilisation ist eine Geschichte davon, wie man Arbeit teilt. Ein Bauer auf dem Land kann sein eigenes Haus bauen, seine Nahrung anbauen und seinen eigenen Brunnen graben, doch in einer großen Stadt wie München geht das nicht mehr.

Spektrum: Die Großprojekte ähneln dann eher der Organisation einer Stadt?

White: In den großen Experimenten der Teilchenphysik ist die Arbeitsteilung enorm weit entwickelt. Ein einziges Experiment des Large Hadron Colliders, der demnächst in der Nähe von Genf in Betrieb gehen soll, ist größer und komplexer als anderswo ein ganzes Forschungsprogramm. Die einen Forscher entwickeln Magneten, andere bereiten die Signalerkennung vor, wiederum andere simulieren die Messdaten, und so weiter. Auch die Analyse der Daten ist in viele Aufgaben unterteilt. Es ist nicht mehr so, dass jemand mit einer Nebelkammer ein Bild aufnimmt und es untersucht. Auf Grund der Arbeitsteilung ist es schwer zu erkennen, wer für ein Forschungsergebnis verantwortlich ist, und so sind es in der Teilchenphysik die Projektleiter, welche die Nobelpreise einheimsen. Ich behaupte nicht, dass sie keine guten Wissenschaftler sind, doch wer ein dermaßen großes Projekt leitet, ist vor allem ein Manager.

Spektrum: Was ist in der Astronomie anders?

White: Zum Glück ist es bei uns noch nicht so weit gekommen. Hier wird die Arbeit meist anders aufgeteilt, und zwar zwischen denen, die Instrumente bauen, und denen, die sie benutzen. Das Weltraumteleskop Hubble etwa konnte nur dank enormer technischer Fertigkeiten der Ingenieure in Betrieb gehen – und doch kann jeder einzelne Forscher einen

Simon White

Nach Professuren in Berkeley (Kalifornien) und Tucson (Arizona) ist der Brite seit 1994 Direktor am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München.

▶ Aufsehen erregte er unter anderem mit Arbeiten über die Rolle der Dunklen Materie bei der Galaxienentstehung.
▶ Er ist federführend an der Millenium-Simulation beteiligt, der bislang größten Berechnung zur Entstehung kosmischer Strukturen.
▶ 2005 verlieh ihm die *Royal Astronomical Society* ihre Goldmedaille.

Antrag stellen und das Gerät benutzen. So gibt es einfach mehr Raum für individuelle, kreative Projekte. Diese lassen sich in viel kürzerer Zeit bearbeiten. Natürlich waren viele Leute mit unterschiedlicher Qualifikation nötig, um Hubble zu bauen. Dabei sollten jedoch die Ingenieure für ihre technische Leistung die ihnen gebührende Anerkennung finden, die Manager für die Organisation und die Wissenschaftler für ihre Forschung.

Spektrum: Hat der Trend hin zu großen Projekten mit Himmelsdurchmusterungen wie dem Sloan Digital Sky Survey und Cosmos *(Cosmic Evolution Survey)* nicht längst die Astronomie erreicht? Sind Sie ein Don Quichotte, der gegen Windmühlen kämpft?

White: In gewisser Weise bin ich das wohl. Tatsächlich gibt es viele Situationen, in denen Sie nur mit einem großen Projekt vorankommen können. Um das zu verwirklichen, brauchen Sie jedoch andere Leute als in einem kleinen Team. Sie brauchen Mitarbeiter mit verschiedenen Fertigkeiten, die damit zufrieden sind, Anweisungen zu befolgen. Sie müssen diszipliniert sein, um in einem großen Team etwas zu erreichen. So kann man auch in der Astronomie wichtige Fortschritte erzielen. Schwierig wird es allerdings, sobald dieser Arbeitsstil die astronomische Forschung dominiert. Dann kann sich der Charakter des Fachs ändern. In den letzten fünfzig Jahren war die Astronomie vor allem dann erfolgreich, wenn Wissenschaftler neue technische Entwicklungen kurzfristig und flexibel für ihre Zwecke nutzen konnten – das ist in großen Projekten unmöglich.

Spektrum: Was bedeutet das für die Forscher?

White: Spüren diejenigen, die unabhängig oder kreativ arbeiten oder »anarchistisch« – wie auch immer Sie das nennen wollen –, dass für sie in der Astronomie kein Platz mehr ist, dann werden sie das Fach wechseln. In der Praxis lassen sich die wichtigen Fortschritte in der Forschung nicht planen. Bei den großen Projekten tun Sie aber so, als ob das ginge. Doch weder Einstein hat so gearbeitet noch Maxwell oder Newton. Höchstens Tycho Brahe in seiner Sternwarte auf der Insel Hven. Da haben Sie also doch ein historisches Beispiel für diesen Stil … (lacht)

Spektrum: Zukünftig wird es vermutlich mehr Doktoranden und Postdoktoranden geben, die sich auf Aspekte der Datenanalyse konzentrieren.

White: Ganz bestimmt. Ich spreche da vielleicht aus meiner eigenen Sicht. Aber ich persönlich finde es einfach ziemlich unattraktiv, in einem riesigen Team zu arbeiten. Da komme ich rein und verbessere dann eine bestimmte statistische Methode und weiß, dass es erst in zehn oder zwölf Jahren ein Ergebnis gibt. Vielleicht haben wir dann das Higgs-Teilchen gefunden oder die Dunkle Energie genauer vermessen. Sicherlich freuen sich die Projektleiter ganz besonders darüber, und zwar aus offensichtlichen Gründen.

»Wenn Großprojekte die Astronomie dominieren, werden kreative Forscher das Fach verlassen«

Spektrum: Die Mitarbeiter sehen das sicherlich anders …

White: Sollte diese Arbeitskultur die Oberhand gewinnen, werden die wirklich kreativen und motivierten Leute dabei nicht mitmachen und sich lieber ein anderes Forschungsgebiet suchen, in dem sie in kürzerer Zeit einen wesentlichen Eigenbeitrag leisten können. Wenn Sie Mitte zwanzig sind, erscheinen Ihnen zehn Jahre als eine sehr lange Zeit. Sollte dieser Trend dominieren, verliert die Astronomie ihre kreativen Köpfe. Das ist eine ernste Gefahr.

Spektrum: Wenn der Trend hin zu großen Kollaborationen geht – können Astronomen davon nicht auch etwas Neues lernen?

White: Das schon. Stellen Sie diese Frage einem Teilchenphysiker, dann sagt er Ihnen, die Astronomen können lernen, wie man vernünftig mit großen Datenmengen umgeht und ein großes Projekt durchführt – und hat damit sogar Recht. Denn tatsächlich war der Sloan Digital Sky Survey, der die Helligkeiten, Farben und Spektren von einigen Millionen astronomischer Objekte misst, in Schwierigkeiten, solange ihn die Astronomen an der Universität von Chicago betreuten.

Spektrum: Was passierte dann?

White: Dann wechselte das Management zum Fermilab, einem Labor der Teilchenphysik. Die wussten, wie man mit so vielen Daten und einem so großen Haushalt umgeht. Und plötzlich funktionierte es, auch wenn die Astronomen das im Nachhinein nicht gerne hören.

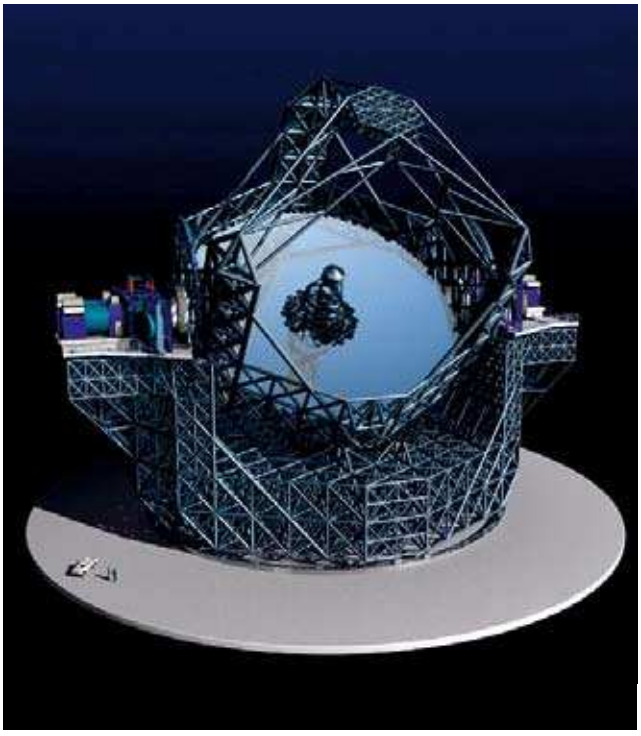
In dieser Hinsicht haben Sie also Recht. Doch bei jedem großen Projekt brauchen Sie ein gutes Management. Das gilt auch für das James Webb Space Telescope, das jetzt gebaut wird, und andere Satelliten. Sie müssen dafür nicht auch gleich das Beobachtungsprogramm festlegen. Das können Sie ruhig einem Komitee aus Fachleuten überlassen, so wie das heute beim Weltraumteleskop Hubble geschieht.

Spektrum: Über die Finanzierung von Großprojekten entscheiden Politiker …

White: … und genau aus diesem Grund ist es für manche attraktiv, die Dunkle Energie zu erforschen! Um Geld zu bekommen, müssen Sie in wenigen Punkten formulieren können, was Sie tun wollen. Sie müssen auf einer halben Seite beschreiben können, warum man eine Milliarde Dollar für Ihr Projekt ausgeben sollte, weil es das wichtigste Ding auf der Welt ist. Die Dunkle Energie gibt Ihnen die Gelegenheit, das zu behaupten! Doch so wird verleugnet, wie die Forschung tatsächlich funktioniert, und das kann großen Schaden anrichten.

Spektrum: Müssen die neuen Großprojekte anders begutachtet und bewilligt werden, als es in der Astronomie bislang üblich ist? ▷

SDSS-KOLLABORATION



ESO

Das 2,5-Meter-Teleskop des Sloan Digital Sky Survey steht auf dem Apache Point (New Mexico; links). Bislang nur als Modell existiert das geplante European Extremely Large Telescope der Eso (rechts).

▷ **White:** Ich glaube schon, und die Praxis wird zunehmend der Finanzierung von Teilchenbeschleunigern ähneln. Früher benutzten Astronomen die Teleskope ihrer Universität, dann diejenigen ihres Staates und später die ihrer Nation. Heute gibt es internationale Einrichtungen, auch wir erreichen also Grenzen. In den USA führt das bereits zu einem Problem. Dort veröffentlicht die Nationale Akademie der Wissenschaften traditionell einen Zehnjahresbericht zur Lage der Astronomie und gibt Politikern Empfehlungen.

Inzwischen sind viele der größeren Projekte nach zehn Jahren noch längst nicht abgeschlossen. Auch größere Satellitenprojekte fallen aus diesem Rahmen heraus. Allerdings ist keines der bislang vorgeschlagenen Projekte zur Dunklen Energie so groß.

Spektrum: Dass die Astronomie bereits heute mit großen Instrumenten an die Grenzen des Machbaren stößt, zeigt doch das geplante Großteleskop E-ELT (European Extremely Large Telescope) der Europäischen Südsternwarte (Eso). Dessen geplanter Spiegeldurchmesser wurde nach einer im letzten Jahr veröffentlichten Machbarkeitsstudie von 100 Meter auf 42 Meter Durchmesser reduziert. Dennoch soll es fast eine Milliarde Euro kosten – und einen beträchtlichen Anteil des europäischen Astronomie-Haushalts verschlingen.

White: Das stimmt. Die US-amerikanische National Science Foundation reagierte auf die drohende Dominanz der Großprojekte damit, ein Drittel des Haushalts für Großprojekte zu investieren, ein Drittel für mittlere und ein Drittel für kleine Projekte. Auch wenn man in Europa noch nicht offen über eine solche Lösung diskutiert, würde man es hier sicher als unpassend empfinden, wenn die Eso ihr ganzes Geld in das E-ELT stecken würde.

Davon einmal abgesehen gibt es noch viele Fragen, die wir mit den 8-Meter-Teleskopen des Very Large Telescope beantworten können. Vor allem brauchen wir Teleskope, an denen man relativ kurzfristig innovative Instrumente entwickeln und einsetzen kann. Ein neues Instrument für das E-ELT zu entwickeln kostet viel Geld und dauert zehn Jahre. Um auf jeden Fall gute Ergebnisse erzielen zu können, wird man damit vielleicht nur ziemlich konservative Beobachtungen planen.

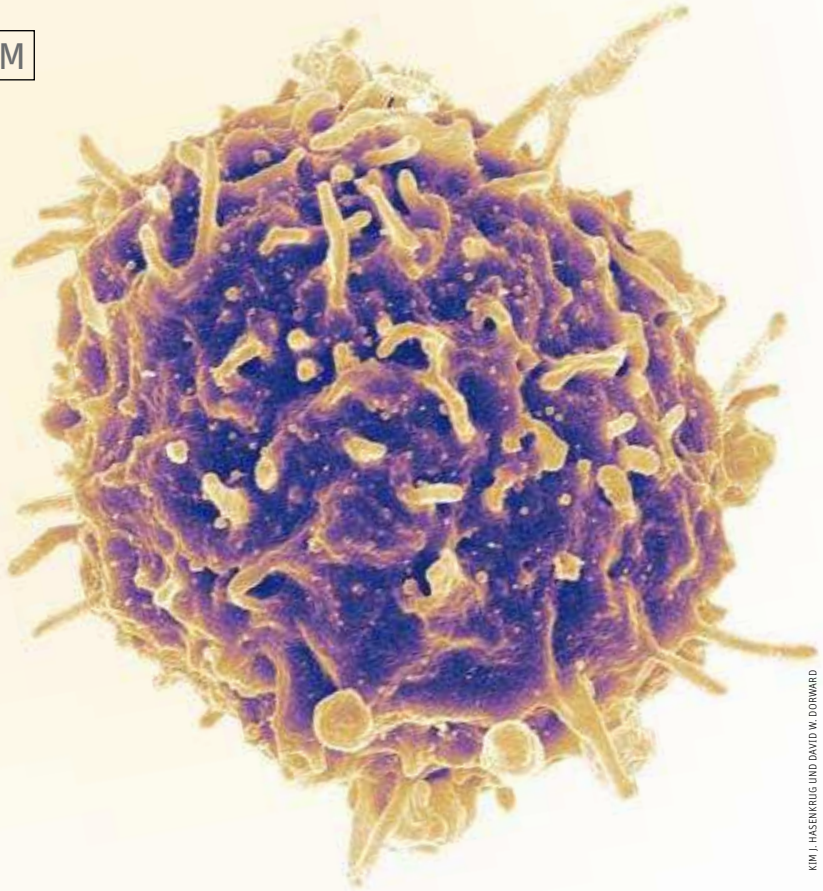
Spektrum: In einem Gespräch mit der Zeitschrift »Nature« staunt Matt Mountain über Ihre Meinung. Er ist als Direktor des Space Telescope Science Institute in Baltimore für den wissenschaftlichen Betrieb des Weltraumteleskops Hubble verantwortlich. Mountain behauptet, kein anderes Thema hätte ähnlich viel Reklame für die Astronomie gemacht wie die Dunkle Energie.

White: Mich wundert, dass ausgerechnet er das sagt. Denn schließlich steht gerade Hubble für die Vielfalt in der Astronomie. Durch die Pressemitteilungen wirbt sein Institut besonders erfolgreich für unsere Wissenschaft. Nur wenige davon behandelten, wie man aus Hubble-Beobachtungen entfernter Supernovae auf die Dunkle Energie schloss. Das begeistert die Menschen, aber es ist nur eines von vielen spannenden Dingen, die Hubble beobachtet hat.

Spektrum: Auch unsere Leser fasziniert die Dunkle Energie besonders – sie war das Titelthema unseres Aprilhefts …

White: Ich finde auch, dass die Dunkle Energie spannend genug ist, um darüber eine Titelgeschichte zu machen, aber wann können Sie die nächste bringen? Vielleicht in fünf Jahren! Doch schon im nächsten Monat brauchen Sie wieder ein neues Titelbild. Seien Sie bloß froh, dass es in der Astronomie neben der Dunklen Energie so viele andere schöne und interessante Dinge zu erforschen gibt! ◁

Die Fragen stellte **Götz Hoeppe**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



KIM J. HASENKRUG UND DAVID W. DORWARD

Wie sich das Immunsystem selbst kontrolliert

Lange vermutet, aber erst vor wenigen Jahren bewiesen – die Existenz regulatorischer Zellen, die das Immunsystem zügeln und daran hindern, den eigenen Körper anzugreifen. Sie verheißen neue Möglichkeiten, beispielsweise Jugenddiabetes oder die Abstoßung von Transplantaten zu unterdrücken.

Von Zoltan Fehervari und Shimon Sakaguchi

Horror autotoxicus – Furcht vor Selbstzerstörung: Diesen Begriff prägte Paul Ehrlich 1899 für das Phänomen, dass körpereigene Zellen bei seinen Übertragungsexperimenten nicht angegriffen wurden. Eine solche Attacke hielt er für biologisch möglich – der visionäre Mediziner und Chemiker sprach von »Autoimmunität« –, sie werde aber irgendwie unterdrückt. Dem widersprach die medizinische Gemeinde. Ihr Fehlschluss: Autoimmunität könne es von Natur aus nicht geben; welche Fehlentwicklung der Evolution hätte ein derart furchtbares Selbstzerstörungspotenzial auch nur im Entferntesten zulassen sollen?

Nach und nach wurde indes eine Reihe rätselhafter Leiden als Beispiele für Autoimmunangriffe entlarvt, darunter multiple Sklerose, insulinabhängiger Diabetes (der vorwiegend in der Jugend auftritt) und rheumatoide Arthritis. Meist erwiesen sich hier weiße Blutkörperchen aus der Klasse der T-Lymphocyten als fehlgeleitet, und zwar solche des CD4-Typs. Diese Sorte T-Zellen ist durch ein Molekül, eben mit dem Namenskürzel CD4, charakterisiert, das sie mit ihrer Reifung im Thymus (daher das T) auf ihrer Oberfläche ausprägt. Als Offiziere bei den Streitkräften des Immunsystems kommt ihnen die Aufgabe zu, Kampftruppen ins Gefecht gegen Krankheitserreger zu schicken. Doch manche der Zellen können den Angriff auf körpereigene Strukturen lenken.

Auch mit seiner zweiten Vermutung lag Ehrlich richtig, wie neuere Arbeiten belegen: Es gibt offensichtlich eigens Zellen, die solches Fehlverhalten abblocken, und zwar ebenfalls mit CD4-Status. Diese so genannten regulatorischen T-Zellen sind lebenswichtig, um die Harmonie zwischen Immunsystem und körpereigenem Gewebe aufrechtzuerhalten. Zunehmend wird aber klar, dass sie weit mehr tun, als bloß Autoimmunität zu unterdrücken. So beeinflussen sie auch das Verhalten des Abwehrsystems gegen-

Eine regulatorische T-Zelle der Maus – ohne ihre Funktionsfähigkeit spielt das Immunsystem verrückt.

über Krankheitserregern, Tumoren, Organtransplantaten und dem ungeborenen Kind im Mutterleib. Wie etliche andere Wissenschaftler wollen wir genau verstehen, auf welche Weise diese erstaunlichen Zellen ihre Aufgaben wahrnehmen und warum ihnen dabei manchmal Fehler unterlaufen. Damit sollten sich zugleich Wege auftun, die Regulatoren ihrerseits zu regulieren. Die Hoffnung besteht also, Aktivitäten des Immunsystems je nach Bedarf abschwächen oder verstärken und dadurch einige der größten medizinischen Herausforderungen besser angehen zu können.

Wie schon die frühen Immunologen zu Ehrlichs Zeiten mag viele Menschen heutzutage der Gedanke verstören, in ihnen könnten – selbst wenn sie sich bester Gesundheit erfreuen – Abwehrzellen mit zerstörerischem Potenzial schlummern, die unter Umständen eine Autoimmunerkrankung entfesseln. Doch das Vorhandensein eines solchen Damoklesschwerts ist leicht zu belegen. Bekommt etwa eine Maus Proteine des eigenen Zentralnervensystems zusammen mit einer immunstimulierenden Hilfssubstanz, einem so genannten Adjuvanz, injiziert, so baut sich eine zerstörerische Reaktion auf. Ähnlich wie bei der menschlichen multiplen Sklerose leiten T-Zellen einen Angriff auf Gehirn und Rückenmark des Tieres ein. Körpereigenes – das »Selbst« – wird hier wie Fremdes behandelt.

Mit Selbst-Proteinen aus anderen Geweben lassen sich im Laborexperiment weitere Autoimmunerkrankungen provozieren, was zeigt, dass potenziell schädliche, autoreaktive Immunzellen Angriffe gegen eine Vielzahl von körpereigenen Strukturen lancieren können. Und dies gilt offenbar auch für den Menschen: Autoreaktive Immunzellen lassen sich mit einfachen Mitteln aus dem Blut von Gesunden isolieren; im Reagenzglas sprechen sie dann heftig auf Proben von Eigengewebe an.

Angesichts solch klarer Demonstration drohender Gefahr stellte sich natürlich die Frage, warum der Organismus trotzdem zumeist von Autoimmunkrankheiten verschont bleibt. Anders formuliert: Wie »lernt« das Immunsystem zwischen Körpergeweben und beispielsweise bedrohlichen Mikroben zu unterscheiden? Wie sich herausstellte, ergreift es zahlreiche Maßnahmen, um Attacken gegen eigene Zellen vorzubeugen und somit Selbst-Toleranz zu erreichen. Die erste, zentrale Sicherheitsschleuse – zumindest was T-Zellen anbelangt – befindet sich im Thymus. In diesem unscheinbaren Organ hinter dem Brustbein werden die unreifen, zu schulenden Abwehrzellen einer strengen Auslese unterworfen: Reagieren sie zu stark (und damit schädigend) auf Körperzellen, werden sie ausgemerzt (siehe links im Kasten S. 56). Kein System ist indes perfekt, und so gelingt es immer wieder einigen autoaggressiven Zellen, durch die Kontrolle zu schlüpfen. Einmal ins Blut- und Lymphsystem gelangt, bergen sie das Potenzial für Autoimmunkrankheiten.

Das Rätsel der zerstörten Eierstöcke

Hier kommt die zweite, periphere Schutzlinie ins Spiel, die sich nochmals auffächert. Zum Beispiel bleiben manche Bereiche, darunter Gehirn und Rückenmark, für die Spähtrupps der Immunzellen weit gehend unzugänglich. Diese Isolation bietet freilich keine vollständige Sicherheit. Bei Verletzungen etwa der Blut-Hirn-Schranke finden selbstreaktive Immunzellen Eintrittspforten. Andere Sicherheitsvorkehrungen sind weniger passiver als vorsorglich aktiver Natur. So können Immunzellen mit einem übermäßigen Interesse für körpereigenes Gewebe durch andere Komponenten des Immunsystems gezielt als zu zerstörendes Ziel markiert oder auch stillgelegt werden. Regulatorischen T-Zellen mag dabei die wohl entscheidendste Rolle zukommen. Die meisten, vielleicht auch alle, erlernen (wie bei T-Zellen üblich) ihre künftige Spezialaufgabe im Thymus. Dann schwärmen sie aus und verteilen sich über den Körper.

Die ersten Hinweise auf die Existenz von regulatorischen T-Zellen reichen erstaunlich weit zurück. Bereits 1969 beobachteten Yasuaki Nishizuka und Teruyo Sakakura vom Aichi Cancer Center Research Institute in Nagoia (Japan) etwas Merkwürdiges bei Mäuseweibchen: Wurde den neugeborenen Tieren der Thymus operativ entfernt, so verkümmerten schließlich ihre Eierstöcke. Gab der eine Art Hormon ab, welches das Überleben der sich entwickelnden Ovarien sicherte?

Der Verdacht erwies sich später als falsch. Bei den operierten Mäusen wanderten vielmehr Abwehrzellen in die Eierstöcke ein und zerstörten sie – es handelte sich daher um eine Autoimmunerkrankung, vermutlich ausgelöst durch den Verlust eines ausgleichenden Regelmechanismus. Eine Übertragung von T-Zellen aus passenden erwachsenen unoperierten Spendermäusen hemmte das krankhafte Geschehen. Offenbar konnten sich also T-Zellen zeitweise irgendwie gegenseitig im Zaum halten.

In den frühen 1970er Jahren beobachtete John Penhale von der Universität Edinburgh bei ausgewachsenen Ratten Ähnliches. Wie Richard Gershon von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) als Erster vorschlug, müsste es eine Gruppe von T-Zellen geben, die dazu bestimmt war, Immunreaktionen zu dämpfen – darunter auch solche, ▷

In Kürze

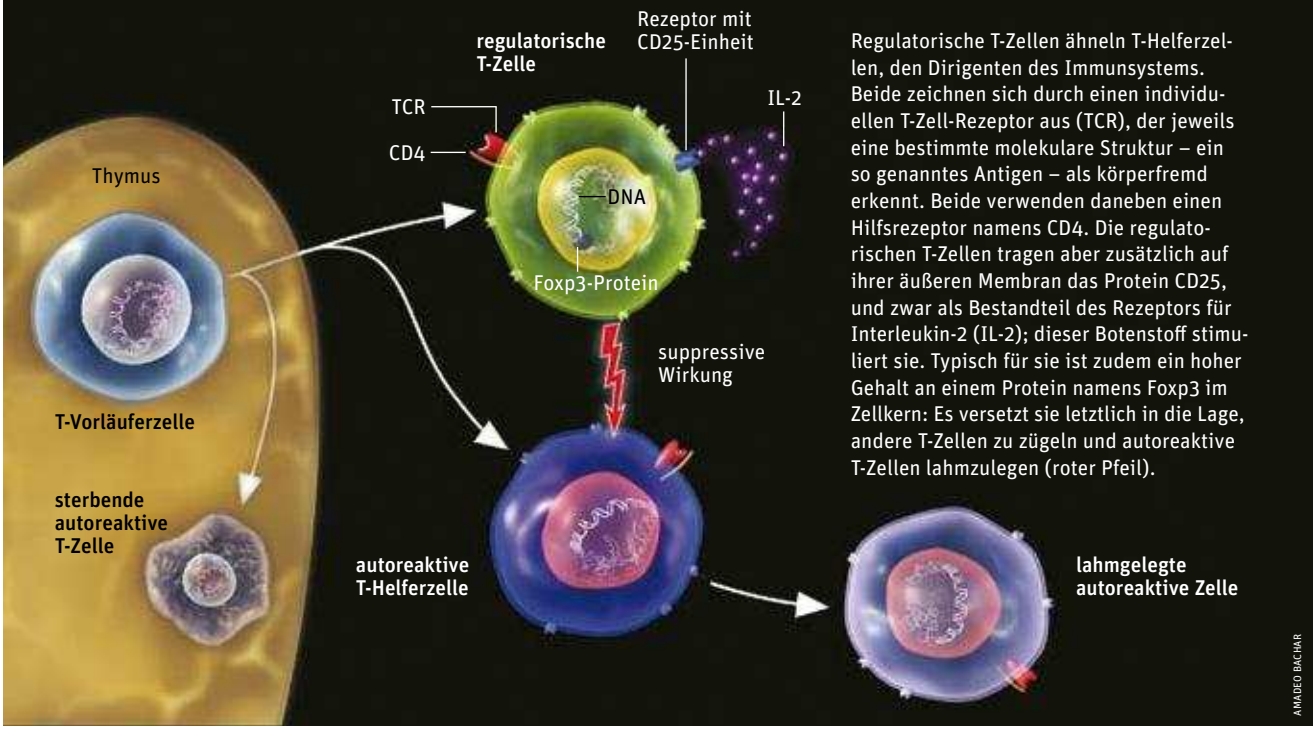
▶ Jahrelang bezweifelten Immunologen die **Existenz von Spezialzellen** zur Unterdrückung der Immunaktivität. Doch es gibt diese so genannten regulatorischen T-Zellen tatsächlich.

▶ Ihre Aufgaben: **Autoimmunreaktionen** zu verhindern, nützliche Darmbakterien zu schützen und Schwangerschaften aufrechtzuerhalten. Auch tragen sie dazu bei, einer neuerlichen Infektion durch den gleichen Erreger zu widerstehen. Die Kehrseite der Medaille: **Tumorzellen** nutzen die Regulatoren, um den Angriffen der Immunabwehr zu entgehen.

▶ Aktuelle Forschungsergebnisse wecken Hoffnung auf neue **Therapien für Autoimmunerkrankungen und Krebs**. Auch Empfängern von Transplantaten bleibt vielleicht einmal die lebenslange Einnahme immunsuppressiver Medikamente erspart.

Mechanismen der Toleranz

Regulatorische T-Zellen stellen mit sicher, dass andere Komponenten des Immunsystems kein Eigengewebe angreifen. Im Thymus, in dem alle Typen von T-Zellen heranreifen, werden bereits die meisten Verdächtigen eliminiert (links). Als verdächtig gilt eine künftige Abwehrzelle, wenn ihr Rezeptor zu stark an körpereigene Strukturen andockt – sie ist übermäßig »autoreaktiv«. Was durch die Maschen schlüpft, wird gewöhnlich von patrouillierenden regulatorischen T-Zellen in Schach gehalten (rechts).



▷ die sich gegen das eigene Gewebe richteten. Diese hypothetischen Akteure wurden T-Suppressorzellen getauft. Doch damals gelang es keinem Forscher, solche Zellen aufzuspüren oder einen molekularen Mechanismus zu finden, über den eine Immunzelle eine andere zügeln konnte. Folglich fristete das Konzept der T-Suppressorzellen lange Zeit ein Schattendasein in der etablierten Immunologie.

Trotzdem versuchten einige Forscher hartnäckig, T-Zellen zu identifizieren, die Autoimmunkrankheiten zu verhindern vermochten. In erster Linie hofften sie auf ein verräterisches molekulares Oberflächenmerkmal – einen so genannten Marker –, anhand dessen sich die gewünschten Zellen von anderen unterscheiden ließen. Seit Mitte der 1980er Jahre wurden zahlreiche Kandidaten gehandelt, aber erst 1995 wies einer von uns (Sakaguchi) CD25 als einen verlässlichen Marker bei Mäusen nach: Entfernte er CD4-T-Zellen, die zusätzlich dieses Molekül auf der Oberfläche trugen, so kam es zum immunologischen Angriff auf verschiedene Organe, insbesondere auf Schilddrüse, Magen, Keim- und Speicheldrüsen sowie Bauchspeicheldrüse. Kennzeichen waren heftige Entzündungen, weil weiße Blutkörperchen regelrecht ins Gewebe einschwärmten und es schädigten.

Eine entscheidende Bestätigung lieferte wieder ein Experiment an Mäusen. Zunächst wurde aus normalen Tieren eine übliche Mischung von T-Zellen gewonnen und dann die Fraktion mit der Kombination CD4 und CD25 darin reduziert. Sie stellte offenbar nur höchstens 10 Prozent der Gesamtheit. Den verbliebenen Mix bekamen Mäuse übertragen, denen ein eigenes Immunsystem fehlte. Sie entwickelten danach ein Spektrum von Autoimmunerkrankungen, die umso schlimmer verliefen, je gründlicher die entsprechenden T-Zellen zuvor entfernt worden waren. Deren vollständiges Aussortieren endete für die Empfänger oft tödlich. Wurden die kritischen T-Zellen aber wieder zugefügt, wobei eine vergleichsweise geringe Zahl reichte, so erlangten die Tiere eine normale Immunität und waren vor diesen Erkrankungen geschützt. Reine Reagenzglasversuche erbrachten ebenfalls wertvolle bestätigende Hinweise. Vielleicht um »Suppressorzellen« von jeglichem Stigma zu befreien, das diesem Begriff anhaftete, nannten die Immunologen sie fortan immer häufiger »$CD25^+$ regulatorische T-Zellen« oder einfach nur T-regs (in lautmalerischer Anlehnung an den Tyrannosaurier *T. rex*).

Wie die Regulatorzellen im Einzelnen die Autoimmunität unterdrücken, ist trotz intensiver Forschungen noch immer rätselhaft. Offenbar drosseln sie die Aktivität einer Vielzahl von Immunzellen, indem sie diese daran hindern, sich zu vermehren oder beispielsweise Botenstoffe aus der Gruppe der Cytokine an Nachbarn zu schicken. Die Wissenschaftler sind sich auch annähernd einig, dass die T-regs selbst durch direkten Zell-Zell-Kontakt aktiviert werden. Darüber hinaus bleibt aber noch vieles offen (siehe Kasten S. 58/59).

Was Entwicklung und Funktion von regulatorischen T-Zellen anbelangt, stießen vor Kurzem immerhin mehrere Teams auf neue Hinweise. Dazu gehörte unser Labor an der Universität Kioto (Japan), eine Gruppe um Alexander Rudensky an der Universität von Washington in Seattle sowie eine um Fred Ramsdell von der Firma CellTech R&D in Bothell (US-Bundesstaat Washington). Im Innern dieser Zellen fand sich das Protein Foxp3 in großer Menge; es ist sogar stärker angereichert als irgendein anderes für T-regs beschriebenes charakteristisches Molekül.

Bei Foxp3 handelt es sich um einen Transkriptionsfaktor: Solche Moleküle regulieren die Aktivität bestimmter Gene, indem sie das Abschreiben, die Transkription, der darauf verschlüsselten Bauanweisung für Proteine beeinflussen. Weil Proteine zu den wichtigsten molekularen Werkzeugen der Zelle gehören, kann eine veränderte Erzeugung eines oder mehrerer von ihnen die Zellfunktion beeinflussen. Die vom Foxp3-Molekül vermittelten Änderungen der Genaktivität stellen die Weichen so, dass sich entwickelnde T-Zellen zur regulatorischen Spezies heranreifen. Künstlich in ansonsten unauffällige T-Zellen gebracht, veranlasst es deren Umprogrammierung: Sie erlangen die volle Fähigkeit zur Immunsuppression, als seien sie als fertige Regulatoren aus dem Thymus gekommen. Bei dem in Fachkreisen gut bekannten Mäusestamm namens Scurfy wurde kürzlich nachgewiesen, dass regulatorische T-Zellen völlig fehlen, weil die Tiere nur eine mutierte, inaktive Form des Foxp3-Proteins bilden. Ihr Immunsystem entgleist; schließlich sterben sie an den Folgen schwerer Entzündungen in mehreren Organen.

Das Wissen um regulatorische T-Zellen bei Tieren soll letztlich dem Menschen zugutekommen. Welche Hinweise gibt es also dafür, dass sie überhaupt bei uns vorkommen und auch eine ähnliche Rolle spielen? Tatsächlich finden sich die charakteristischen molekularen Merkmale – CD25 außen und große Mengen an Foxp3 innen – auch bei einer Untergruppe menschlicher T-Zellen. Und zumindest im Reagenzglas zeigt sie einen immununterdrückenden Effekt.

Den vielleicht überzeugendsten Hinweis auf eine lebenswichtige Rolle beim Menschen liefert eine seltene genetische Krankheit mit dem Kürzel IPEX (mit Immun-Dysregulation, Polyendokrinopathie und Enteropathie einhergehendes X-chromosomal vererbtes Syndrom). Weil deren Ursache in einem mutierten Gen auf dem X-Chromosom liegt, sind nur Jungen von dieser schweren Krankheit betroffen. Denn anders als Mädchen haben sie nur ein X-Chromosom – und somit keine Chance, mit einer zweiten gesunden Genkopie den Fehler auszugleichen. Die Folgen sind Autoimmunerkrankungen, darunter der Schild- und Bauchspeicheldrüse (Letzteres wie bei insulinabhängigem Diabetes), hinzu kommen chronisch entzündliche Darmerkrankungen und medikamentös nicht kontrollierbare Allergien (Nahrungsmittelallergien und schwere Hautentzündungen).

Alle Symptome lassen sich als vielfältige Erscheinungsformen eines überaktiven Immunsystems verstehen, das nicht von regulatorischen T-Zellen im Zaum gehalten wird. Die Krankheit führt bereits im Kindesalter oder wenig später zum Tod, wobei die Mitursachen dafür von Autoimmundiabetes bis zu schwerem Durchfall reichen. Tatsächlich beruht sie nach neueren Erkenntnissen auf einem mutierten Gen für das Foxp3-Protein und ist somit das menschliche Pendant der Erkrankungen von Scurfy-Mäusen.

Wahlloses Wüten im Darm verursacht Kollateralschäden

Die Indizien sprechen also dafür, dass regulatorische T-Zellen auch beim Menschen Autoimmunerkrankungen verhindern. Doch offensichtlich dienen die Friedensstifter auf noch auf andere Weise der Gesundheit, etwa indem sie sich – auf überraschende Art – an der Immunantwort gegen Mikroben beteiligen. In den 1990er Jahren übertrugen Fiona Powrie und ihre Kollegen vom DNAX-Forschungsinstitut in Palo Alto (Kalifornien) T-Zellpopulationen ohne den Regulatorenanteil auf Mäuse ohne eigenes Immunsystem. In einer Serie von Experimenten löste der Transfer eine schwere, häufig tödlich verlaufende Form einer chronisch entzündlichen Darmerkrankung aus. Die fehlerhafte Immunreaktion richtete sich indes nicht unmittelbar gegen das Eigengewebe.

Der Darm von Nagern ist – ebenso wie der des Menschen – von unzähligen Bakterien besiedelt. Auf jedes Gramm Gewebe kommen typischerweise über eine Billion. Zwar körperfremd, sind sie doch gewöhnlich nichts Schädliches – im Gegenteil, sie fördern die Verdauung und verdrängen sogar gefährliche Bakterien wie etwa Salmonellen, die sonst das Milieu besiedeln würden. Im Normalfall

Ohne regulatorische T-Zellen war das Immunsystem offensichtlich bereit, bei geringstem Reiz harmlose, ja nützliche Darmbakterien zu attackieren

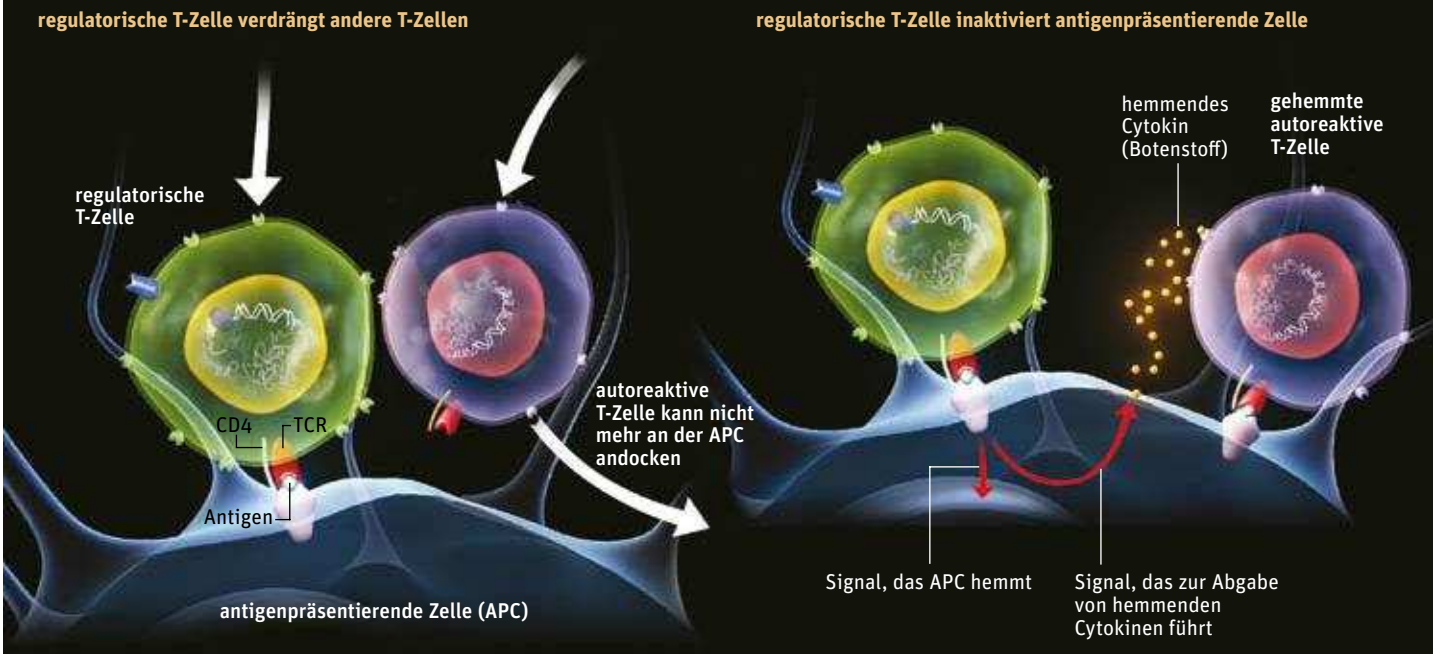
toleriert das Immunsystem die Helfer. Doch bei Powries Mäusen attackierten die neuen Abwehrzellen die harmlosen Darmbewohner, und dieser Angriff führte zu »Kollateralschäden« am Gewebe des Empfängers. Transferierte regulatorische T-Zellen allein verursachten dagegen keine Probleme. Wurden sie zusammen mit den anderen T-Zellen übertragen, verhinderte das sogar die sonst resultierende Darmerkrankung. Offensichtlich war das Immunsystem bereit, bei geringstem Reiz die Darmbakterien anzugreifen und wurde dabei allein von den regulatorischen T-Zellen in Schach gehalten.

Eine ähnliche Balance beeinflusst möglicherweise die Immunantwort auf schädliche Eindringlinge. Das kann heikel sein. Einerseits dürften regulatorische T-Zellen dabei eine überschießende Reaktion zügeln. Andererseits könnten sie aber dadurch den Eindringling vor seiner völligen Beseitigung bewahren und es ihm ermöglichen, zu überdauern und sich bei Gelegenheit wieder auszubreiten. Ein Beispiel dafür liefert das inzwischen als Auslöser von Magengeschwüren entlarvte Bakterium *Helicobacter pylori*. Manches deutet darauf hin, dass hartnäckig Infizierte den Keim deshalb nicht loswerden, weil ihre regulatorischen T-Zellen die Waffen der Immunabwehr stumpf machen.

Möglicherweise ist es jedoch gar keine so schlechte Sache, einige Eindringlinge am Leben zu lassen. Dies legen Arbeiten von David Sacks und seinen Kollegen an ▷

Wie schützen T-Regs vor Autoimmunität?

Noch weiss niemand genau, wie regulatorische T-Zellen Autoimmunangriffe – solche auf körpereigenes Gewebe – verhindern. Drei denkbare Möglichkeiten sind hier dargestellt. Alle setzen bei einem Schlüsselschritt zum Auslösen einer Immunantwort an: der Signalübermittlung zwischen einer T-Zelle und einer antigenpräsentierenden Zelle (APC). Letztere legt Proben von Antigenen zur Überprüfung vor. Erkennt der T-Zell-Rezeptor (TCR) einer T-Helferzelle oder einer T-Killerzelle (die vor allem einem Virusbefall nachspürt) ein präsentiertes Antigen und empfängt dabei noch be-



Durch Andocken an die APC hindert die regulatorische T-Zelle andere T-Zellen daran, ebenfalls anzuklinken.

Die regulatorische T-Zelle signalisiert der APC, entweder anderen T-Zellen keine aktivierenden Botschaften zu übermitteln oder diese Zellen sogar zu unterdrücken, etwa durch die Freisetzung hemmender Cytokine.

▷ den Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) nahe. Die Wissenschaftler infizierten Mäuse mit einem relativ harmlosen Parasiten. Selbst bei einem völlig intakten Immunsystem überlebten einige der Schmarotzer. Wurden die Tiere erneut infiziert, so kam es zu einer sofortigen wirksamen Immunantwort. Ganz anders verhielt es sich, wenn man ihnen am Anfang regulatorische T-Zellen entfernte. Dann wurden die Parasiten der Erstinfektion zwar ausgemerzt; doch auf einen zweiten Befall reagierte das Immunsystem ineffizient – als wäre es nie zuvor dem Eindringling begegnet. Offenbar tragen regulatorische T-Zellen zum Erhalt des so genannten immunologischen Gedächtnisses bei, das Immunität gegen wiederholte Infektionen gewährleistet. Auch Impfungen stützen sich auf dieses Prinzip.

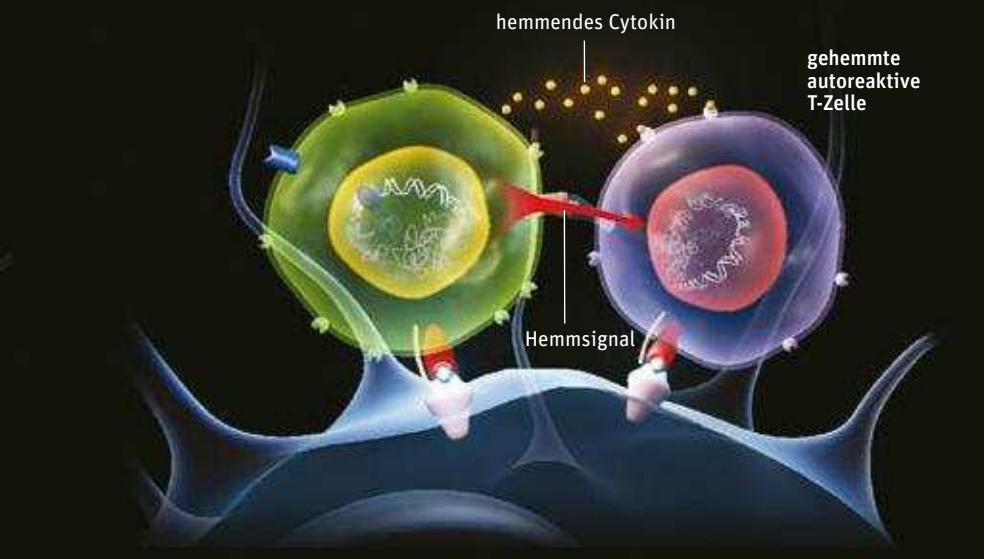
Selbst bei Schwangerschaften scheinen regulatorische T-Zellen eine Rolle zu spielen. Denn das Ungeborene stellt die Immunabwehr der Schwangeren vor eine besondere Herausforderung. Weil es seine Gene zur Hälfte vom Vater hat, unterscheidet es sich zu 50 Prozent von seiner Mutter – verkörpert somit immunologisch im Prinzip eine Art Organtransplantat.

Eine gewisse Sicherheit vor einer Abstoßung bieten mehrere Vorkehrungen, zunächst einmal im Trophoblasten – das ist der Teil der künftigen Plazenta, mit dem sich der Embryo an der Gebärmutterwand verankert. Dieses plazentale Gewebe bildet dabei nicht nur eine physische Barriere gegen mögliche Angreifer aus dem mütterlichen Blutkreislauf, sondern produziert zudem immununterdrückende Moleküle.

Im Gegenzug scheint auch das mütterliche Immunsystem einige Veränderungen zu durchlaufen. Erste Hinweise lieferten Frauen, die darüber berichteten, dass die Beschwerden ihrer Autoimmunkrankheit (etwa der multiplen Sklerose) während der Schwangerschaft zurückgegangen waren. Einige Experimente aus jüngerer Zeit stützen direkter die Idee, dass eine stärkere Aktivität regulatorischer T-Zellen dabei eine Rolle spielt. Wie Alexander Betz und seine Kollegen an der Universität Cambridge (Großbritannien) feststellten, erhöht sich im Blut trächtiger Mäuse die Anzahl der Friedensstifter. Wurde umgekehrt experimentell für ein Fehlen gesorgt, so durchbrachen aggressive Immunzellen in großer Zahl die plazentale Schranke, was schließlich zur Abstoßung der Feten führte. Sollte eine unzureichende Aktivi-

stimmte zusätzliche Signale von der APC, so wird die zugehörige T-Zelle aktiviert. Dabei ist es gleichgültig, ob das Antigen vom Körpergewebe oder von einem Krankheitserreger stammt. Über ihren eigenen TCR erkennt eine regulatorische T-Zelle ebenfalls ein bestimmtes Antigen und unterdrückt dann gezielt andere T-Zellen, die auf eben dieses Antigen ansprechen.

regulatorische T-Zelle legt andere T-Zellen direkt still



Die regulatorische T-Zelle benutzt die APC vor allem als Plattform, um den Kontakt mit anderen, benachbart angeklinkten T-Zellen zu stabilisieren. Sie schickt ein Hemmsignal direkt in die T-Zelle (nach jüngsten Erkenntnissen deutscher Forscher anscheinend einen Schwall des sekundären Botenstoffs cAMP) oder setzt hemmende Moleküle frei, die im Nahbereich wirken.

AMADEO BACHAR

tät regulatorischer T-Zellen bei manchen Frauen der Auslöser für wiederholte spontane Aborte sein?

T-regs stellen also ein wirksames natürliches Instrument zur Kontrolle von Immunreaktionen dar. Sie könnten daher zu mächtigen Verbündeten im Kampf gegen ein breites Spektrum von Störungen werden – wenn es gelingt, ihr therapeutisches Potenzial zu erschließen.

Unfreiwillige Beihilfe zu Krebs

Für die Anwendung in der ambulanten Praxis ist es noch zu früh, doch wecken die bisherigen Ergebnisse die Hoffnung, dass sich einmal entweder durch Zufuhr der Zellen selbst oder aber durch Medikamente, die deren Aktivität modulieren, neuartige Behandlungsmöglichkeiten bieten. Tatsächlich werden solche Ansätze teilweise bereits in klinischen Studien am Menschen geprüft (siehe Kasten auf S. 61).

Durch die Aktivierung von regulatorischen T-Zellen sollten sich beispielsweise Autoimmunkrankheiten bekämpfen lassen. Entsprechende Wirkstoffe werden unter anderem gegen multiple Sklerose und Schuppenflechte bereits am Patienten erprobt. Ein Ankurbeln der T-reg-Aktivität mag sich auch gegen Allergien als nützlich erweisen. Besonders viel versprechend erscheint allerdings der Versuch, über diese Zellen, die mit leichter Hand Immunreaktionen bändigen, ein Abstoßen transplantierter Organe zu verhindern. Im Idealfall würden die Empfänger dann das fremde Gewebe ebenso gut wie ihr eigenes tolerieren (siehe Kasten S. 60). Optimal wäre dabei eine dauerhafte Toleranz, die es erlaubt, auf immunsuppressive Medikamente zu verzichten, deren Einnahme mit vielen Nebenwirkungen verbunden ist.

Denkbar sind auch Therapien, die auf dem entgegengesetzten Prinzip basieren: durch selektives Entfernen von regulatorischen T-Zellen unerwünschte Immunsuppressionen zu unterbinden und somit vorteilhafte Immunantworten zu stärken. In der Praxis dürfte ein bloßes »Ausdünnen« der Zellen vorzuziehen sein, weil dies das Risiko senken sollte, versehentlich Autoimmunreaktionen auszulösen. Das Beste wäre, man könnte nur eben jene der Regulatoren aus dem Verkehr ziehen, welche die gerade gewünschte Immunantwort blockieren. Dieser Ansatz sollte sich besonders bei Infektionskrankheiten eignen, die von der Immunabwehr allein nur unzureichend bekämpft werden – etwa Tuberkulose oder auch Aids.

Vielleicht erweist sich die Reduktion regulatorischer T-Zellen auch als vorteilhaft im Kampf gegen Krebs. Vieles deutet darauf hin, dass im Körper patrouillierende Immunzellen Ausschau nach molekularen Abweichungen halten, zu denen es in entarteten Zellen kommt. In dem Maße aber, wie regulatorische T-Zellen ein Vorgehen gegen das an sich körpereigene Gewebe verhindern, dürften sie ungewollt dazu beitragen, dass ein Tumor heranwächst.

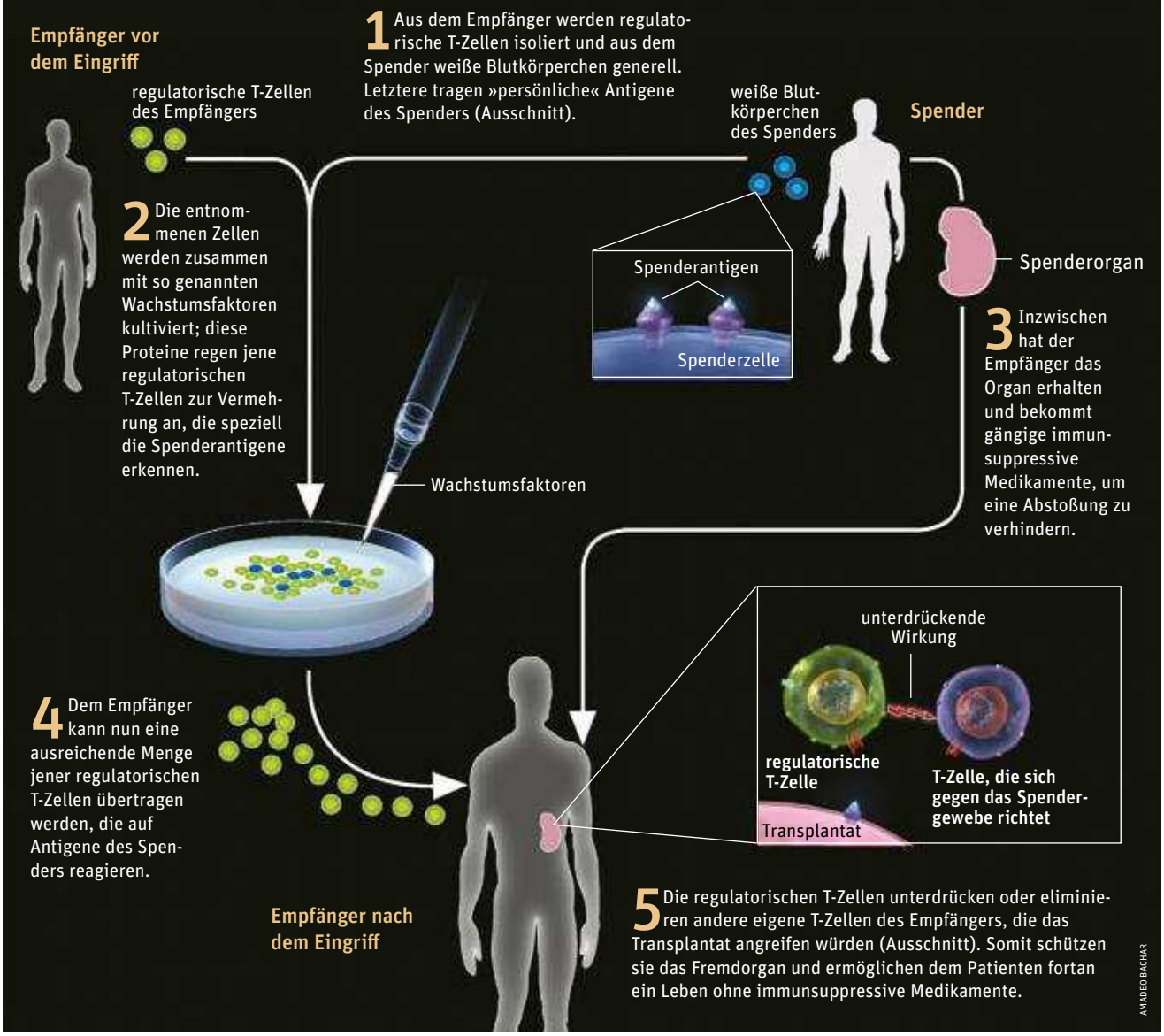
Einige Arten von Krebs scheinen dies sogar unmittelbar auszunutzen: durch Abgabe von Botenstoffen, die T-regs anlocken und andere T-Zellen dazu bringen, sich in regulatorische zu verwandeln. So gibt es einige Hinweise, dass sich Krebskranke durch eine abnorm hohe Zahl an aktiven regulatorischen T-Zellen im Blut und im Tumorgewebe auszeichnen. Tatsächlich dreht sich ein Großteil der entsprechenden Forschung heute um die therapeutische Nutzung regulatorischer T-Zellen bei Krebs.

Die große Herausforderung liegt darin, Medikamente zu entwickeln, die den Bestand an regulatorischen T-Zellen im Körper eines Patienten entweder ausdünnen oder erweitern können. Um wirklich zweckmäßig zu sein, müssten die Wirkstoffe nur an den Untergruppen von T-regs ansetzen, die bei der jeweiligen Erkrankung eine Rolle spielen. Doch oft ist nicht genau bekannt, um welche der Untergruppen es sich dabei handelt, welche also anzuvisieren sind.

Ein ebenso schwieriges Unterfangen ist die Entwicklung von Therapien, die ▷

Organtransplantation der Zukunft

Eine auf regulatorischen T-Zellen basierende Therapie könnte eines Tages transplantierte Organe besser vor der Abstoßung bewahren und den Zeitraum, über den ein Patient immunsuppressive Medikamente mit ihren unerwünschten Nebenwirkungen benötigt, beträchtlich verkürzen. Ein mögliches Vorgehen ist dargestellt.



▷ auf der direkten Verabreichung regulatorischer T-Zellen basieren. Eines der Haupthindernisse besteht darin, genügend davon zu gewinnen. Die Forscher wissen zwar, dass die Regulatoren schon ihre Wirkung entfalten können, wenn sie in der Minderzahl gegenüber den zu unterdrücken Zellen sind. Um aber eine Autoimmunerkrankung beim Menschen zu kontrollieren, wären vermutlich immer noch Dutzende Millionen erforderlich. Eine so große Anzahl dieser relativ seltenen Exemplare direkt aus dem Blutkreislauf einer Person zu gewinnen, ist voraussichtlich nicht möglich. Somit sind Verfahren zur Zellvermehrung außerhalb des Körpers wohl unerlässlich.

Wie mehrere Forschungsteams weltweit inzwischen berichteten, lassen sich Zellen mit immunsuppressiver Wirkung in relativ großer Menge herstellen, indem man gewöhnliche T-Zellen einem wohl definierten Cocktail an biochemischen Signalen aussetzt. Ob diese so genannten Tr1-Zellen identisch mit regulatorischen T-Zellen sind, bleibt noch zu klären. Jedenfalls wirken sie ausgesprochen immunsuppressiv.

Da das Foxp3-Protein ein Schlüsselmolekül ist, das die Entwicklung und Funktion von T-regs kontrolliert, besteht außerdem die Möglichkeit, mit gängigen Labormethoden sein Gen in häufiger vorkommende und daher leichter zu gewinnende Typen von T-Zellen zu übertragen, damit diese sich umwandeln.

Wirkstoffe zur Manipulation von T-regs

Methoden, die an regulatorischen T-Zellen ansetzen, werden bereits klinisch erprobt oder befinden sich kurz davor; einige sind hier aufgelistet. Die meisten zielen darauf ab, die T-regs zu hemmen oder zu reduzieren, damit diese nicht länger Immunangriffe auf Tumoren unterdrücken. Die Gabe der entsprechenden Wirkstoffe müsste jedoch sorgfältig austariert erfolgen, damit ein Absenken der T-reg-Aktivität zu keinen Autoimmunreaktionen führt und eine Steigerung nicht Krebs fördert.

Wirkung auf regulatorische T-Zellen	Beispiele für anvisierte Krankheiten	Behandlungsansatz
Reduktion oder Hemmung (um die Immunantwort zu stärken)	Hautkrebs (Melanom), Eierstock- und Nierenkrebs	ein Gift, gekoppelt an einen Botenstoff wie Interleukin-2, der es an regulatorische T-Zellen heranbringt; monoklonale Antikörper, die entweder den Tod von regulatorischen T-Zellen einleiten oder deren schützendes Eindringen in Tumoren verhindern können
Vermehrung im Patienten (um Autoimmunität zu dämpfen)	multiple Sklerose, Schuppenflechte, Morbus Crohn, insulinabhängiger Diabetes	Impfstoff aus Bestandteilen des T-Zell-Rezeptors, die regulatorische T-Zellen vermutlich zur Vermehrung anregen; monoklonaler Antikörper, der sich an das Molekül CD3 heftet und offenbar so regulatorische T-Zellen stimuliert
Vermehrung im Labor unter Zusatz von Proteinen, dann Transfer in den Körper des Patienten	Transplantat-gegen-Empfänger-Reaktion (Abwehrzellen in gespendetem Knochenmark attackieren Körpergewebe des Empfängers)	Kultivierung regulatorischer T-Zellen des Spenders zusammen mit bestimmten monoklonalen Antikörpern und Wachstumsfaktoren, dann Übertragung der vermehrten Zellen vor oder während der Knochenmarktransplantation beziehungsweise bei Auftreten einer Transplantat-gegen-Empfänger-Reaktion

Wie viele andere Gruppen verfolgen wir diesen Ansatz intensiv und wollen dabei auch die molekularen Vorgänge verstehen, die während der Entwicklung der regulatorischen Zellen die Produktion von Foxp3 anwerfen. Mit diesem Wissen könnten Pharmaforscher Wirkstoffe entwickeln, die speziell hier ansetzen. Dann wäre es nicht mehr nötig, Zellen außerhalb des Körpers zu manipulieren und wieder einzubringen.

Eine Zellspritze gegen Organabstoßung?

Für Organtransplantationen wird derzeit ein anderer Weg erwogen. Er sieht vor, regulatorische T-Zellen einem potenziellen Empfänger zu entnehmen und zusammen mit Zellen vom Organspender in einer Weise zu kultivieren, dass sich jene regulatorischen T-Zellen vermehren, die eine Abstoßung am besten unterdrücken (siehe Kasten links). Bei Nagern hat sich dieses Verfahren bereits bewährt. So konnte einer von uns (Sakaguchi) bei ihnen zeigen, dass die Injektion einer Einzeldosis solcher T-regs bei einer Hauttransplantation ausreichte, um eine dauerhafte Toleranz des Fremdgewebes zu erzielen. Ohne diese Maßnahme wird es typischerweise heftig abgestoßen. Mehr noch: Das übrige Immunsystem blieb dabei arbeitsfähig, wehrte also bakterielle Eindringlinge normal ab. Dieser Ansatz könnte angesichts des nun viel beackerten Forschungsfelds bald auch für den Menschen Wirklichkeit werden. Künftige Empfänger von Transplantaten ließen sich auf diese Weise schützen, bis medikamentöse Behandlungen entwickelt sind, die auf einfachere Weise das gleiche Ziel erreichen.

In den letzten zehn Jahren hat sich unser Verständnis des Immunsystems tief greifend gewandelt. Zwar zirkulieren, wie wir heute wissen, »verbotene« T-Zellen – mit einem für den Körper zerstörerischen Potenzial – durchaus durch Blut und Lymphe, doch gegen sie hält das System Gegenspieler aus der gleichen Familie parat. Herauszufinden, wie sich regulatorische T-Zellen entwickeln und dabei ihre erstaunliche Fähigkeit zur Immununterdrückung entfalten, wird das Schlüsselwissen für einen künftigen Einsatz gegen eine Fülle behindernder und sogar tödlicher Leiden liefern.

Mit ihrer Fähigkeit, die Zerstörung von Fremdem zuzulassen und dabei Eigenes zu bewahren, werden sich regulatorische T-Zellen womöglich als die ultimativen immunologischen Friedensstifter erweisen. ◁

Zoltan Fehervari promovierte an der Universität Cambridge (Großbritannien) in Immunologie und ging 2002 als Postdoktorand in das Labor von **Shimon Sakaguchi** am Institute for Frontier Medical Sciences der Universität Kioto (Japan). Sakaguchi, Professor und Leiter des dortigen Department of Experimental Pathology, begann bereits in den frühen 1980er Jahren nach regulatorischen T-Zellen zu suchen und ist seither diesem Forschungsgebiet treu geblieben.

Regulatory T cells, tumour immunity and immunotherapy. Von W. Zou in: Nature Reviews Immunology, Bd. 6, Nr.4, S. 295, 2006

Regulatory T-cell therapy: Is it ready for the clinic? Von J. A. Bluestone in: Nature Reviews Immunology, Bd. 5, Nr. 4, S. 343, April 2005

Naturally arising $CD4^+$ Regulatory T cells for immunologic self-tolerance and negative control of immune responses. Von Shimon Sakaguchi in: Annual Review of Immunology, Bd. 22, S. 531, 2004

T-Lymphocytes: Regulatory. Von Zoltan Fehervari and Shimon Sakaguchi in Encyclopedia of Life Sciences. Wiley InterScience, 2006. Kostenpflichtig verfügbar unter www.els.net

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893107.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Projekt »sauberer Diesel«

Raffinierte Katalysatoren, Biokraftstoffe und diverse Filter nehmen dem Diesel das Negativ-Image der Dreckschleuder.

Von Steven Ashley

Der Trucker öffnet die Tür seines Lasters, steigt auf den Fahrersitz und erklimmt das Dach. Er hält ein Taschentuch über die Auspufföffnung – Ruß. »Reicht das?«, fragt er mich. Nur wenige Meter von diesem Lkw entfernt, der im Leerlauf auf dem Rastplatz in New Jersey vor sich hin tuckert, steht eine Limousine des Typs Mercedes-Benz E320 Bluetec. Ich starte den Dieselmotor und spanne ein sauberes Stückchen Stoff über den Auspuff. Auch nach einer vollen Minute kaum eine Verfärbung!

Wie der Taschentuchtest beweist, muss ein »sauberer Diesel« kein Widerspruch in sich sein. Dieses Antriebsaggregat galt lange als Dreckschleuder, nicht zuletzt wohl auf Grund seiner enormen Langlebigkeit, denn selbst jahrzehntealte Exemplare sind heute noch auf den Straßen unterwegs. Der E320 aber gehört zu einer neuen Generation, die viel weniger Schadstoffe emittiert, ohne den Vorteil geringen Kraftstoffverbrauchs preiszugeben. Angetrieben von einem 3-Liter-V6-Motor kommt der E320 mit einer Tankfüllung rund 1200 Kilometer weit.

Geschickt kombinieren die Entwickler eine optimierte Motortechnik mit neuen Abgassystemen und schwefelarmen Kraftstoffen. Das Ergebnis kann sich nicht nur im wahrsten Sinn des Wortes sehen lassen, es erfordert auch keinen exorbitanten Aufpreis. »Der E320 Bluetec wird nur etwa 750 Euro mehr kosten als die entsprechende Benziner-Version«, verspricht Thomas Weber, für Forschung und Entwicklung zuständiges Vorstandsmitglied von DaimlerChrysler am 15. Oktober 2006, dem Tag, an dem in Amerika schwefelarmer Dieselkraftstoff an 76 500 Tankstellen eingeführt wurde.

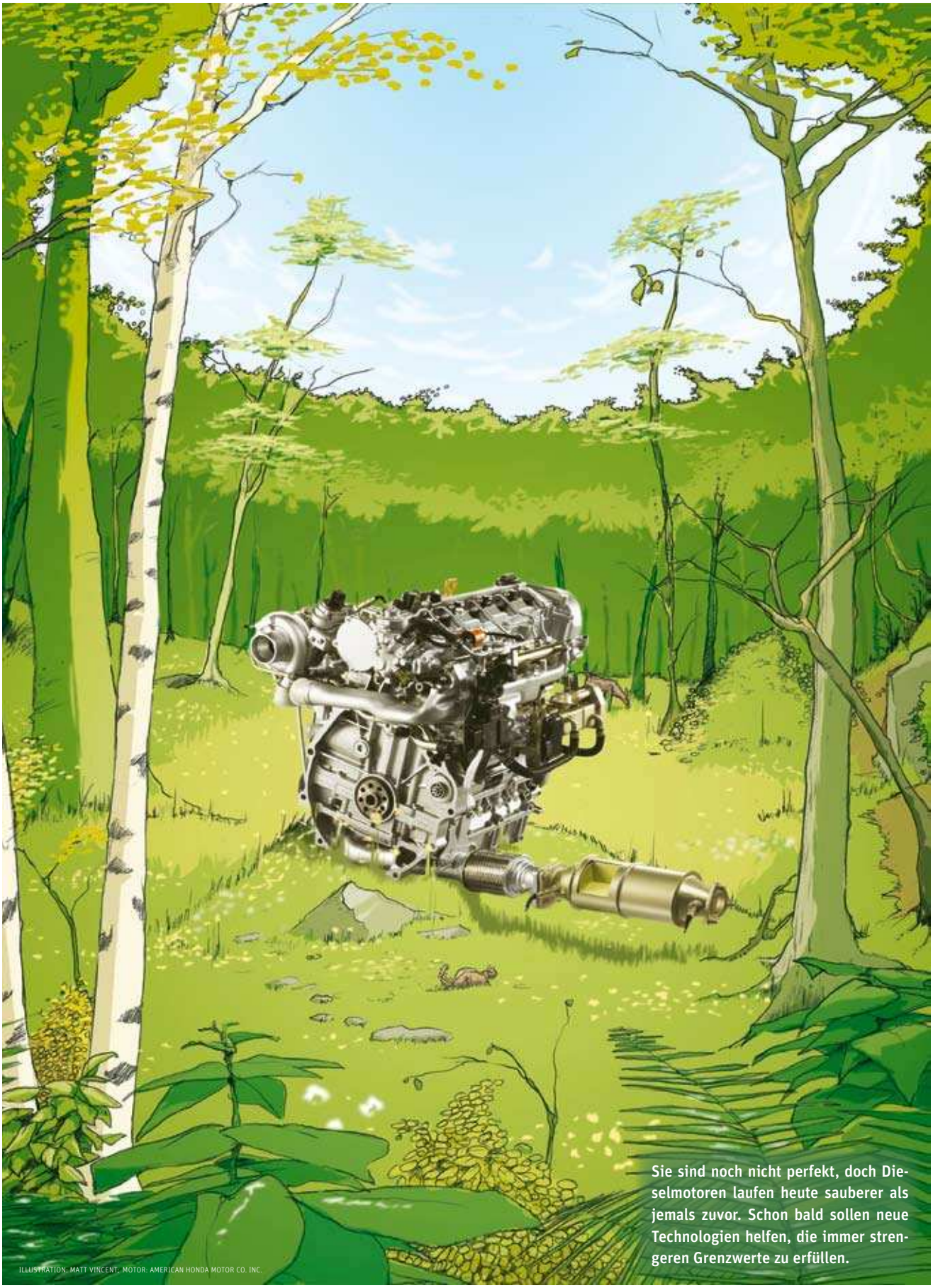
Kampf dem Klimawandel

Auch Volkswagen, Audi, Honda, BMW, General Motors, Ford und andere Firmen wollen in den nächsten Jahren Dieselautos auf den Markt bringen, die annähernd so umweltfreundlich wie Hybridfahrzeuge sind, also die Kombination von Benzin- und Elektromotor, gleichzeitig aber preisgünstiger und weniger komplex. Diese Antriebe sollen ihren Teil dazu beitragen, die Zeit zwischen Motoren, die petrochemische Kraftstoffe verbrennen, und marktreifen Brennstoffzellenantrieben zu überbrücken (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2006, S. 94). Das Ziel ist klar: Sparsamere Motoren setzen weniger Kohlendioxid frei und sind somit ein zentrales Thema im Kampf gegen den globalen Klimawandel. Zudem wollen die westlichen Industrieländer unabhängiger von Erdölimporten werden. Nach Angaben der amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) könnten rund 1,4 Millionen Barrel (223 Millionen Liter) Erdöl pro Tag eingespart werden, wenn ein Drittel aller Autos mit einem Dieselaggregat bestückt wäre. Das entspricht etwa sieben Prozent der täglichen US-Erdölimporte.

Damit kommt der Dieselmaschine eine neue Bedeutung zu. Sie diente schon bald nach ihrer Erfindung durch den deutschen Ingenieur Rudolf Diesel (1858–1913) im Jahr 1890 als Antriebsaggregat in Schwerindustrie und Transportwesen. Während ein Benzinmotor einen elektrischen Funken benötigt, um das vom Kolben verdichtete Kraftstoff-Luft-Gemisch im Zylinder zu zünden, genügt dem Diesel dazu allein die Kompression. Der Kolben presst dort die Luft viel dichter zusammen als im Benziner, sodass sich die Temperatur im Verbrennungsraum auf mehrere hundert Grad erhöht. Wird dann Kraftstoff eingespritzt, explodiert das Gemisch von selbst. Heute kann dieser Selbstzünder aus einer Einheit Dieselöl mehr kinetische Energie gewinnen als sein benzingetriebenes Gegenstück, erklärt Charles Freese, Geschäftsführer Diesel bei General Motors (GM) Powertrain; das verbes- ▷

In Kürze

- Dieselaggregate hatten lange einen schlechten Ruf als »Dreckschleudern«, doch moderne Motoren stoßen bedeutend **weniger Schadstoffe** aus als ihre Vorgänger, und das bei **geringerem Kraftstoffverbrauch** als Ottomotoren. Nach wie vor aber sind Ruß und Stickoxide ein Problem.
- Die Lösung: **Schwefelarmer Diesel** und innovative Systeme zur Abgasnachbehandlung. Damit sollen Dieselmotoren fast so umweltschonend werden wie Hybridfahrzeuge mit ihrer Kopplung von Benzin- und Elektroantrieb.
- Eine wichtige Motivation für die Hersteller: Auf dem amerikanischen und dem europäischen Markt werden die **Emissionsgrenzwerte** immer rigoroser gesenkt.

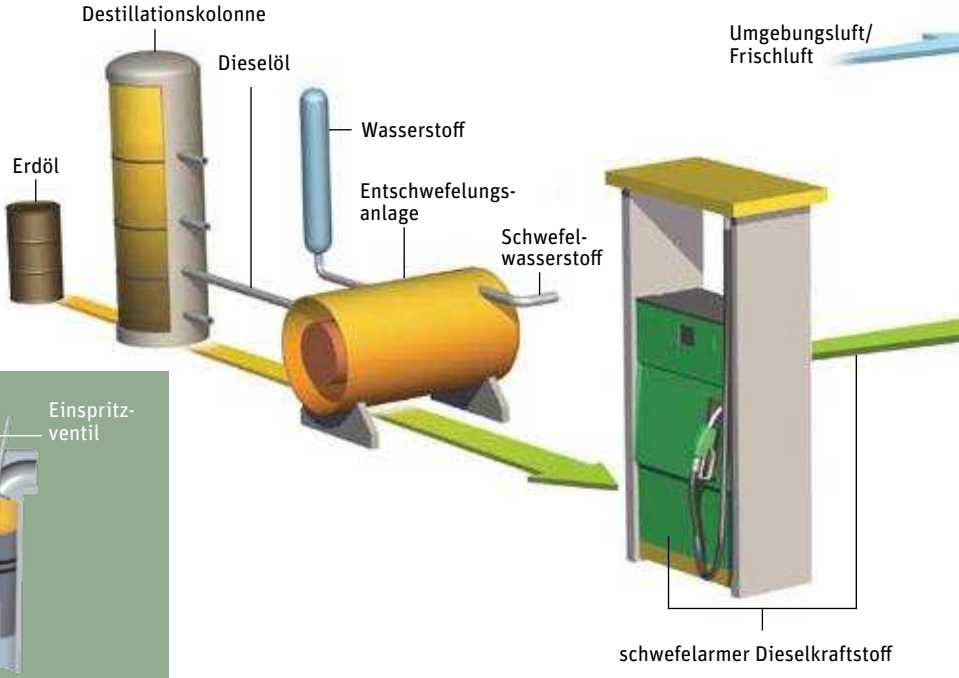


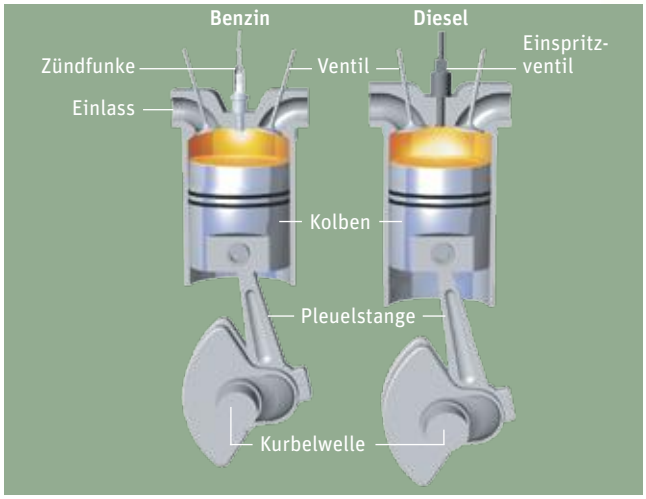
Sie sind noch nicht perfekt, doch Dieselmotoren laufen heute sauberer als jemals zuvor. Schon bald sollen neue Technologien helfen, die immer strengeren Grenzwerte zu erfüllen.

ILLUSTRATION: MATT VINCENT; MOTOR: AMERICAN HONDA MOTOR CO. INC.

Bestandteile eines sauberen Dieselautos

Schwefel, ein Begleitstoff des Erdöls, würde den Rußfilter angreifen, ebenso die Katalysatoren, die Stickoxide (NO_x) im Abgas abbauen sollen. In der Raffinerie wird deshalb der Dieselfraktion Wasserstoff zugesetzt, der sich mit dem Schwefel verbindet. Der Schwefelwasserstoff lässt sich gut entfernen, sodass der resultierende Kraftstoff 97 Prozent weniger des Elements enthält als bisherige Dieselqualitäten.





Der Dieselmotor ist die Verbrennungskraftmaschine mit dem geringsten Verbrauch, weil sie die Kompressionswärme nutzt und nicht die Funkenzündung wie der Benzinmotor (linkes Teilbild). Der Kolbenhub presst das Kraftstoff-Luft-Gemisch so intensiv zusammen, dass es von selbst zündet (rechts).

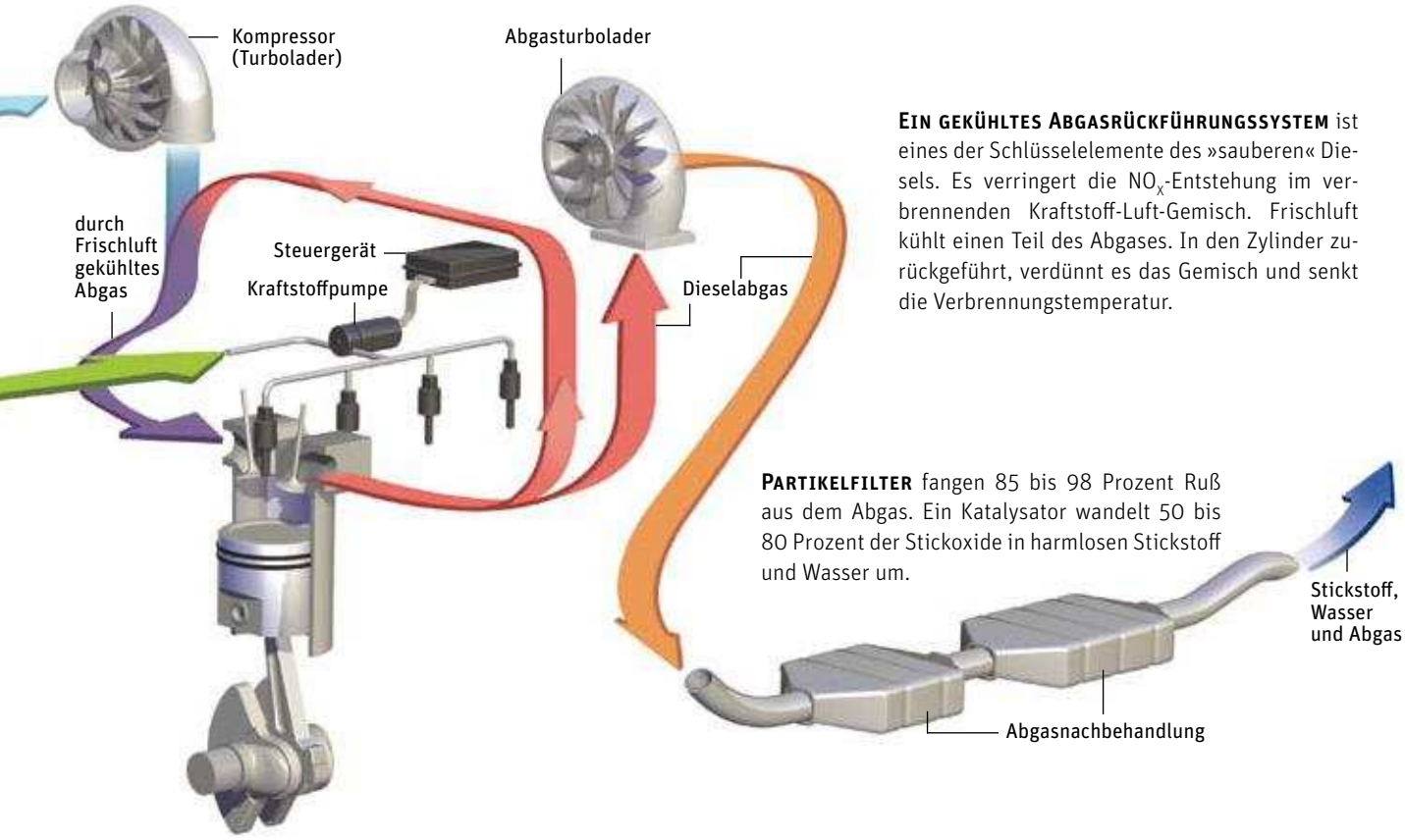
▷ sert die Kraftstoffausbeute um 25 bis 30 Prozent. Beispielsweise begnügen sich so angetriebene Kleinwagen mit 4,5 bis 6 Litern pro hundert Kilometer, während vergleichbare Benziner meist mehr als 6,5 Liter verbrauchen. Dabei bieten Letztere in Sachen Beschleunigung und Wendigkeit keine Vorteile mehr, dank Turbolader und konstruktiver Tricks fahren sich heutige Dieselfahrzeuge genauso spritzig wie ihre Verwandten.

Doch Kraftstoffeigenschaften und höhere Verbrennungstemperatur fördern leider die Emission von Kohlenstoffpartikeln und Stickoxiden (NO_x). Während der Feinstaub, der auf Grund seiner Winzigkeit von oft weniger als einem zehntel Mikrometer in die Atemwege eindringen kann, für Krebs, Asthma, Bronchitis und diverse andere Krankheiten verantwortlich gemacht wird, kann NO_x Smog und sauren Regen verursachen. In Nordamerika gelten für die Oxide inzwischen sechsmal strengere Grenzwerte als in Europa. Und in Sachen Feinstaub wird die Luft ebenfalls dünner. Obwohl in den USA nur 3,4 Prozent aller Autos Dieselfahrzeuge sind, schätzt Richard Kassel, Leiter Umweltfreundliche Kraftstoffe und Kraftfahrzeuge im Umweltschutzrat NRDC der USA (National Resources Defense Council), dass deren Emissionen plus die der dieselbetriebenen Lokomotiven jährlich 25 000 Todesfälle und 2,5 Millionen Ausfalltage zur Folge haben.

Zu hohe Feinstaubbelastung

In Europa sind Kraftstoffe mit geringem Schwefelanteil seit Jahren im Angebot. Hier haben Dieselfahrzeuge mittlerweile einen Anteil von vierzig Prozent am Neuwagenverkauf. Die europäischen Regulierungsbehörden, die schon längere Zeit auf eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs drängen, förderten diesen Trend in den letzten Jahrzehnten vor allem durch eine höhere Besteuerung des Benzins. Allerdings haben sich die Preise der beiden Kraftstoffarten in den letzten Jahren immer mehr angenähert und unterscheiden sich nur noch um Centbeträge. Zudem hat der Feinstaub den Liebling der Umweltpolitik in Verruf gebracht. In Europa gelten seit 2005 strenge Grenzwerte: Überschreitet das Tagesmittel die Konzentration von 50 Mikrogramm Feinstaub pro Kubikmeter Luft an 35 Tagen im Jahr, sind die Mitgliedstaaten zu Gegenmaßnahmen verpflichtet. Deshalb fördert die Bundesregierung seit April 2007 zwei Jahre lang die Nachrüstung mit Rußpartikelfiltern und einige deutsche Städte planen Fahrverbote für »Dreckschleudern«.

Mit anderen Worten: Die Zeit ist reif für die nächste, saubere Generation von Dieselmotoren. Zunächst für das Transportwesen entwickelt, sind einige Innovationen schon auf dem Markt: Die Hochdruckeinspritzung verringert die Injektionszeit des Kraftstoffs und erhöht gleichzeitig die Verdichtung im Zylinder; das Design der Brennkammer und der Ventile wurde verbessert, um durch eine gleichmäßigere Luft-Kraftstoff-Durchmischung die Verbrennung zu optimieren. Indem man das Abgas nutzt, um Kompressoren anzutreiben und so die Luft



Ein gekühltes Abgasrückführungssystem ist eines der Schlüsselelemente des »sauberen« Diesels. Es verringert die NO_X-Entstehung im verbrennenden Kraftstoff-Luft-Gemisch. Frischluft kühlt einen Teil des Abgases. In den Zylinder zurückgeführt, verdünnt es das Gemisch und senkt die Verbrennungstemperatur.

Partikelfilter fangen 85 bis 98 Prozent Ruß aus dem Abgas. Ein Katalysator wandelt 50 bis 80 Prozent der Stickoxide in harmlosen Stickstoff und Wasser um.

GEORGE RETSECK

mit höherem Druck in die Zylinderkammer zu pressen, wird die verfügbare Sauerstoffmenge erhöht; diese Turbolader steigern nicht nur die Leistung des Motors, sondern auch seine Effizienz. Inzwischen werden verschiedene Parameter der Kraftstoffverbrennung mit Sensoren gemessen und je nach der aktuell geforderten Leistung und Drehzahl geregelt.

Ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur NO_X-Reduktion war die Einführung der Abgasrückführung. Sie verdünnt den Sauerstoff im Zylinder; das verlangsamt die Verbrennung und vermeidet die hohen Temperaturen, bei denen NO_X entsteht. In den fast drei Jahrzehnten, die seit der Einführung vergangen sind, konnten die Emissionen laut Industrie um drei Viertel gesenkt werden. Das Neueste auf diesem Gebiet ist die gekühlte Abgasrückführung: Durch Vermischung mit Frischluft sinkt die Temperatur des Auspuffgases, bevor es in den Brennraum gelangt.

Diese modernen Technologien verringern zwar Emissionen, doch die Ziele liegen höher. Schwefelarmer bis -freier Dieselkraftstoff ist ebenfalls vonnöten. Denn Schwefel, ein natürlicher Begleitstoff des Erdöls, heftet sich an die aktiven Schichten von Abgaskatalysatoren und blockiert die Andockstellen für Schadstoffe. Deshalb versetzen Raffinerien den Diesel mit Wasserstoff, der vorzugsweise mit dem Schwefel reagiert und ihn bindet.

Und das ist gut so, denn Filter und Katalysatoren sind das letzte Puzzlestück für den sauberen Diesel. Wenn das Abgas einen modernen Dieselmotor verlässt, passiert es zunächst einen Oxidationskatalysator. Dort wird ein beträchtlicher Teil des Kohlenmonoxids sowie der unverbrannten Kohlenwasserstoffbestandteile durch Oxidation unschädlich gemacht. Anschließend durchströmt das Gas einen Dieselpartikelfilter, der unverbrannten Kohlenstoff – Ruß – ausfiltert. Meist besteht dieser Filter aus hitzebeständiger Keramik wie Siliziumkarbid oder synthetischem Cordierit und besitzt feine Poren, die nach Art einer Bienenwabe angeordnet sind. Aber auch poröse Werkstoffe aus Pulver oder Metallfasern sind inzwischen üblich. Die Oberflächen der Filter werden mit einem Katalysator beschichtet, an dem Rußteilchen haften bleiben; bis zu 98 Prozent lassen sich so herausfiltern.

Die einzige Chance gegen NO_X

Setzen sich diese Oberflächen zu, registrieren Sensoren eine Verlangsamung des Gasflusses. Die Motorsteuerung veranlasst dann, dass für kurze Zeit eine geringe Menge Kraftstoff in den Zylinder eingespritzt wird, um den Kohlenwasserstoffanteil im Abgas zu erhöhen. Im Oxidationskatalysator entzünden sie sich, die Abgastemperatur erreicht dort kurzzeitig etwa 650 Grad Celsius und der festgesetzte Rußkuchen verbrennt.

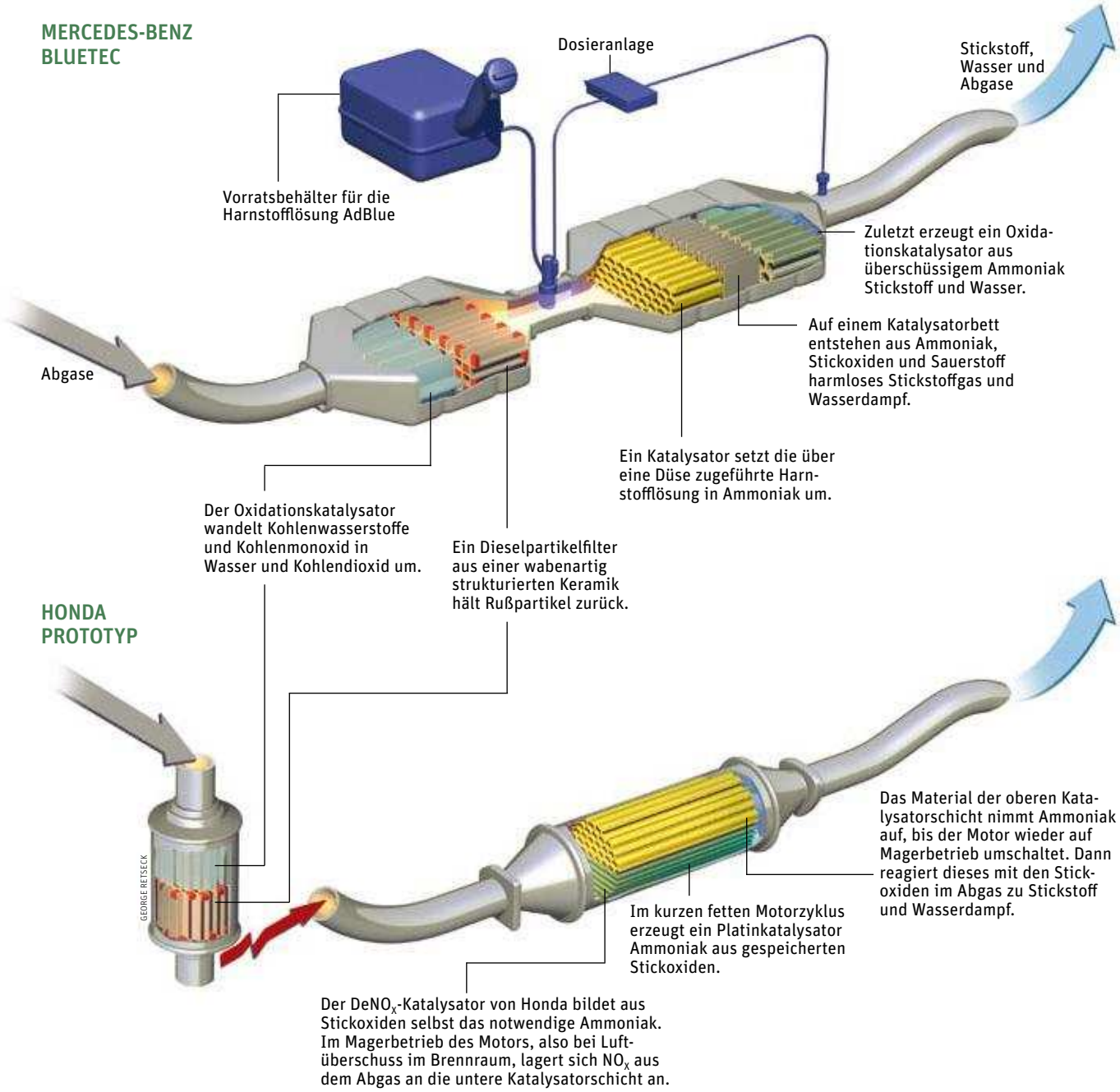
In der Nachbehandlung liegt letztlich die einzige Chance, Stickoxide in den Griff zu bekommen. Denn die zur Bekämpfung der Rußemission eigentlich notwendigen hohen Verbrennungstemperaturen würden wieder die Entstehung von NO_X fördern. Das gilt auch für so ▷

▷ genannte Mager-NO_X-Fallen oder -Katalysatoren. Ein Motor läuft im Magerbetrieb, wenn der Treibstoff sparsam eingespritzt wird, sich also mehr Luftsauerstoff im Gasgemisch befindet, als für die Verbrennung eigentlich notwendig ist. Zweck der Übung: Der Diesel wird vollständiger verbrannt. Der Nachteil: Sauerstoffüberschuss fördert Stickoxid-Bildung.

Es existieren mehrere Ansätze für eine $DeNO_X$-Technologie, also für eine »Entstickung«, weiß Ben Knight, Leiter Forschung und Entwicklung von Honda Amerika. Einer wird als kontinuierliche kohlenwasserstoffselektive katalytische Reduktion bezeichnet. In diesem Fall läuft der Diesel »fett«, wird also weniger effektiv verbrannt. Kohlenwasserstoffe gelangen ins Abgas und übertragen mit Hilfe eines Katalysators Elektronen auf die NO_X-Moleküle; dadurch können diese zu Stickstoff umgebaut werden. Das Verfahren verringerte im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), einem standardisierten Motor- und Fahrzeugtest zur Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen, den Aus-

Erfolgsfaktor Abgasnachbehandlung

Mercedes-Benz und Honda bringen Systeme auf den Markt, die Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Ruß weit gehend aus dem Abgas entfernen sollen.



DAIMLERCHRYSLER AG

Das »grüne« Dieselauto von Mercedes, der E320 Bluetec, ist bereits seit Oktober 2006 in Nordamerika auf dem Markt.

stoß um vierzig Prozent. Allerdings erhöht sich gleichzeitig der Spritverbrauch um fünf Prozent, darüber hinaus ist die NO_X-Umwandlung bei niedrigen Temperaturen wenig effizient.

Eine weitere $DeNO_X$-Technologie ist die Speichertechnik, bei der Stickoxide sozusagen zwischengelagert werden. Sie kommt bereits bei Fahrzeugen mit Benzindirekteinspritzung zur Anwendung. Bei diesem »diskontinuierlichen Verfahren« läuft der Motor zunächst im Magerbetrieb. Ein Katalysator fixiert die NO_X-Moleküle. Für einen kurzen Zeitraum aber wird das Gemisch im Zylinder mit Kraftstoff »aufgefettet«. Durch den Sauerstoffmangel im Abgas lösen sich die Stickoxide aus dem Katalysator und werden reduziert.

Leider erfordert dieses Verfahren beim Dieselmotor erhebliche Anpassungen sowohl in der Konstruktion als auch bei der Prozessführung. Außerdem fällt hier ebenfalls die Wirksamkeit bei niedrigen Temperaturen ab.

Reduktion mit Harnstoff

Eine dritte, heute gängigere Methode ist die selektive katalytische Reduktion SCR *(selective catalytic reduction)*, auch Harnstoff-Einspritzung genannt. Der aus dem Harnstoff gebildete Ammoniak vermag als einzige chemische Verbindung mit Hilfe eines Katalysators Stickoxide direkt zu reduzieren. In der Rauchgasreinigung von Kraftwerken wird die SCR deshalb häufig eingesetzt, im Motorenbau erfordert sie ein zusätzliches Einspritzsystem, das die Menge an Harnstofflösung der aktuellen Stickoxidemission anpasst. Außerdem muss die Tankstelleninfrastruktur entsprechend aufgerüstet werden.

Die nächste Generation der von DaimlerChrysler, Volkswagen und anderen Herstellern favorisierten Bluetec-Methode basiert auf diesem SCR-Verfahren und nutzt eine 32,5-prozentige Harnstofflösung, die bereits weltweit als AdBlue verkauft wird. Die Markenrechte gehören dem deutschen Verband der Automobilindustrie um DaimlerChrysler, BMW und Volkswagen. Laut Thomas Weber von DaimlerChrysler haben seine Ingenieure zusammen mit Forschern von Bosch die NO_X-Emissionen um bis zu achtzig Prozent reduziert. Mit ihrem System ausgestattet habe der Mercedes E320 alle Chancen, die strenge, von der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA geforderte Norm »Tier II/Bin 5« zu erfüllen, nämlich maximal 44 Milligramm NO_X und 6,2 Milligramm Ruß pro Kilometer. Die aktuellen Grenzwerte schafft er bereits mit Abgasreinigungstechniken, welche die Euro-4-Norm erfüllen. Die gilt seit 2005 europaweit für alle neuen Pkw und schreibt für NO_X-Emissionen einen Grenzwert von 250 Milligramm pro Kilometer vor. Ab 2009 wird Euro-5 das Limit auf 180 Milligramm pro Kilometer verschärfen.

Gegenüber den bisherigen US-Vorgaben fordern die neuen eine Verrin- ▷

wichtige**online**adressen

Datenauswertung und Messtechnik
Sensoren, Verstärker, USB-Messkarten
Messprogramme, Auftragsmessungen
Instrumentierung von Prüfständen
www.alles-messen.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

▷ gerung der Rußpartikel auf unter ein Zehntel und eine Reduzierung der Stickoxide auf unter die Hälfte. Noch in diesem Jahr soll der Bin-5-Standard in Kalifornien greifen, dessen Automarkt Maßstäbe für ganz Amerika setzt; ab 2009 gilt er US-weit. Weitere Verschärfungen sind absehbar. Die neue E320-Limousine, so meint Weber, braucht im Durchschnitt nur 0,1 Liter AdBlue pro 100 Kilometer. Der Zusatztank für die Harnstofflösung reiche für die Zeit zwischen den Ölwechseln, ein zusätzlicher Werkstattaufenthalt sei also nicht erforderlich.

Honda hat unlängst über einen neue, sehr elegante Entwicklung seiner Ingenieure berichtet: ein Mager-NO_X-Katalysator mit Umwandlungsraten von neunzig Prozent, der keinerlei zusätzlicher Chemikalien bedarf. Dabei wird ein Teil der Stickoxide in Ammoniak umgewandelt, der den Rest zu Stickstoff reduziert. Dieses »Super Clean Diesel«-Verfahren soll laut Presseberichten bereits 2009 in der Dieselversion des Honda Accord auf den Markt kommen (Grafik S. 66).

Es basiert auf einem kompakten Zweischicht-Katalysator. Die obere Lage besteht aus Zeolithen, Silikat-Mineralen, die dank mikroskopisch feiner Poren eine sehr große Oberfläche für chemische Reaktionen bieten. Die untere Schicht enthält die gängigen Katalysatoren Ceroxid und Platin. »Diese erzeugen Ammoniak aus dem Abgas in den kurzen Intervallen, in denen der Motor fett läuft«, erklärt Ben Knight. »Das wird in den Zeolithen gespeichert und kann dann, wenn der Motor wieder auf Magerbetrieb umschaltet, die Stickoxide reduzieren.«

Die untere Schicht katalysiert nicht nur die direkte Umwandlung aus Stickoxiden und Wasserstoff zu Ammoniak, sondern auch die des benötigten Wasserstoffs aus Kohlenmonoxid und Wasserdampf (Wassergas-Shift-Reaktion). Auf diese Weise lassen sich die Intervalle, in denen der Motor fett laufen muss, kurz und damit der Mehrverbrauch an Kraftstoff in Grenzen halten. Permanente Messung aller Parameter ermöglicht es, die einzelnen Intervalle genau auszusteuern, selbst dann, wenn die Aktivität des Katalysators mit der Zeit nachlassen sollte. Das ist eine ganz entscheidende Voraussetzung dafür, dass Hondas Dieselfahrzeuge zukünftig die bereits erwähnte US-Vorschrift Tier II/Bin 5 auch über die geforderte Laufleistung von gut 200 000 Kilometern einhalten.

Ein neues Kapitel der Dieselgeschichte wird gerade aufgeschlagen, doch ob sie ein Happy End hat, bleibt ungewiss. Obwohl DaimlerChrysler, Honda und VW die Aussichten für den nordamerikanischen Markt optimistisch beurteilen, geben sich die beiden größten Hersteller dort, General Motors und Ford, eher bedeckt. Allenfalls bei Pick-ups und Geländewagen rechnen sie sich Chancen aus, denn der Diesel bietet dort ein hohes Drehmoment und geringen Verbrauch. Toyotas Unternehmenssprecher John Hanson erklärte gar, seine Firma würde die Einführung des Diesels in Nordamerika so bald nicht vorantreiben. Ohnehin hat Toyota Zweifel an den neuen Technologien: »Nicht eines der neuen Modelle wird hinsichtlich der Standards der Umweltschutzbehörde EPA oder der kalifornischen Richtlinien für den Umweltschutz punkten können.«

Vorteile für Europa

Ein großes Hindernis für die neue Technologie ist der Kraftstoff selbst. Schwefelarmer Diesel hat in den USA eine geringere Cetanzahl (wie die Oktanzahl für Benzin ein Qualitätsparameter), als moderne, hochdrehende Motoren benötigen. Bessere Kraftstoffe in gleich bleibender Qualität sind aber nicht in Aussicht, denn die nordamerikanischen Raffinerien sind – anders als die in Europa – darauf ausgelegt, überwiegend Benzin zu produzieren; erhebliche Investitionen wären also erforderlich. Daran werden auch die gänzlich schwefelfreien, aus Pflanzen gewonnenen Biodiesel nach Ansicht von Experten wenig ändern, da sie trotz allen Wachstums in diesem Marktsegment nur einen geringen Teil des Bedarfs decken können. In Europa setzen Mineralölfirmen hingegen auf schwefelfreien synthetischen Diesel, der aus Kohle, Erdgas, Holzabfällen, Energiepflanzen oder schlicht Klärschlamm gewonnen werden kann (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2007, S. 44). Seit 2003 produziert und erprobt ein Konsortium von VW, DaimlerChrysler und dem Mittelständler Choren Industries unter dem Markennamen SunDiesel den ersten synthetischen Biodiesel, der auch als BTL-Kraftstoff bezeichnet wird *(biomass to liquid)*. Der deutsche Verband der Automobilindustrie propagiert vom Jahr 2010 an eine zehnprozentige Beimischung von Biodiesel zum Diesel, während die Europäische Union nur 5,75 Prozent verbindlich vorschreibt.

Auch wenn der Anteil »sauberer« Dieselmotoren insbesondere auf amerikanischen Straßen wohl noch eine Weile in der Minderheit sein wird, rechnet die US-Umweltschutzbehörde EPA dennoch damit, dass Pkw und Nutzfahrzeuge ab 2030 jährlich vier Millionen Tonnen NO_X und 250 000 Tonnen Rußpartikel weniger ausstoßen werden. Richard Kassel vom Natural Resources Defense Council glaubt an einen grundlegenden Wandel, der eben seine Zeit brauche. »Die Situation erinnert mich an die frühen 1970er Jahren, als die Behörden begannen, bleifreies Benzin zu unterstützen. Es dauerte mehr als dreißig Jahre, um zu sauberen und Kraftstoff sparenden Autos zu kommen. Beim Dieselantrieb werden wir einen ähnlichen Wandel erleben, doch der wird innerhalb der nächsten zehn Jahre vonstattengehen.« ◁

Steven Ashley ist Redakteur bei Scientific American.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893103.

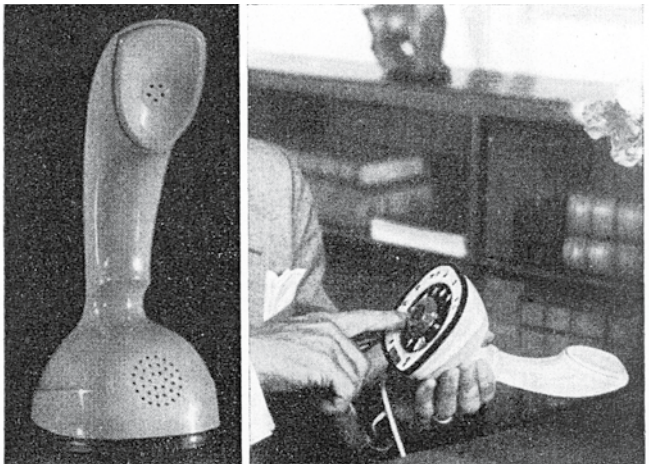
1957

Hormon aus Nieren

»Erythropoeitin ist die Bezeichnung für ein von einer Forschergruppe der Universität Chicago entdecktes Hormon, welches die Bildung der roten Blutkörperchen reguliert. Es wird seinerseits in Abhängigkeit von der Sauerstoffbilanz des Organismus gebildet, und zwar in den Nieren. Das Hormon wirkt unmittelbar auf die Erythropoese im Knochenmark.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, 10. Jg., Heft 8, S. 315, August 1957*

Solarenergie statt Flugbenzin

»Das Modell eines ›Flugzeuges der Zukunft‹, das von Elektromotoren angetrieben wird, die ihren Strom direkt aus in den Tragflächen untergebrachten großen ›Silikonzellen‹ erhalten, in denen das Sonnenlicht in elektrische Energie umgewandelt wird, wurde kürzlich vorgeführt. … Zwar sei die Leistungsfähigkeit der in das Modellflugzeug eingebauten Silikonzellen noch nicht groß genug, um so viel Strom zu erzeugen, damit sich das Flugzeug in die Luft erheben könne, aber der erzeugte Strom reiche immerhin schon aus, um die Propeller zum schnellen Laufen zu bringen.« *Deutsche Erfinder-Post, Heft 8, S. 37, August 1957*



Fast schnurloses Telefon

»Seit über 60 Jahren ist das Mikrotelephon die unangefochtene Idealform des Handapparates. … In dem sogenannten Ericofon bricht die Firma Ericsson mit dieser Grundanordnung, beseitigt den eigentlichen Sprechapparat und legt die Wählscheibe, den Übertrager und den Umschaltkontakt, der ›Das Aushängen‹ steuert, in den Handapparat selbst, so daß nur noch eine Schnurverbindung zwischen der Wandanschlußdose mit dem Anrufsummer und dem Ericofon verbleibt. Mit sehr verringertem Platzbedarf steht der Apparat wie eine moderne Plastik oder Vase auf dem breiten Sockel, in dessen Wand die Mikrophoneinsprache liegt.« *Rundschau, Bd. 9, Heft 8, S. 342, August 1957*

◀ Anrufwahl mit dem Ericofon

Schwingende Ohrmuschel

»Während man früher der Ansicht war, daß das Hören in erster Linie durch Fortpflanzung der Schallwellen, die die Luft in dem äußeren Gehörgang treffen, erfolge, ist Prof. Dr. Geigel in Würzburg zu einem anderen Resultate gekommen. Danach hat die Luft selbst für das Hören wenig Wert. … Die Knorpel der Ohrmuschel nehmen die Schallwellen auf, geraten ins Schwingen und vermitteln diese Schwingungen ohne Uebergang in Luft durch lauter feste Teile dem Trommelfell. … So kann man z. B. recht gut hören, wenn der Gehörgang durch angesammeltes Ohrenschmalz geradezu verstopft ist.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 142, S. 151, August 1907*

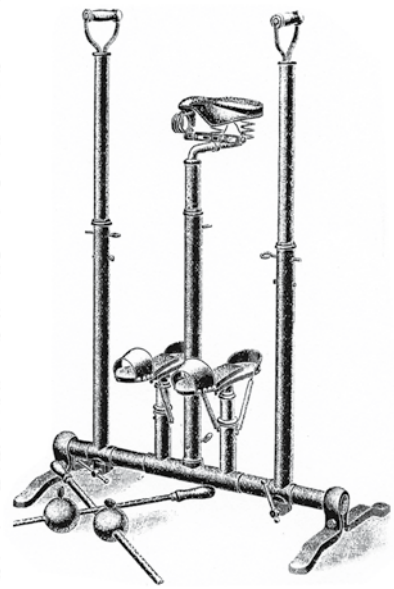
Mit Petroleum gegen Mücken

»Über ›Mückenplage und ihre Bekämpfung‹ schreibt der Direktor des städtischen Gesundheitsamtes Stettin: 1904 wurde der Buchenwald ›Elisenhain‹ bei Greifswald von Mücken befreit. Das Bekämpfungsmittel war Petroleum, das in dünner, aber ununterbrochener Schicht auf den Wassertümpeln ausgebreitet wurde. … Dadurch wird den Mückenlarven die Atmung unmöglich gemacht; sie ersticken. Für den Erfolg dieser Maßnahmen ist Art und Zeit der Ausführung von größter Wichtigkeit. Wenn im Frühjahr aus den Mückeneiern sich die Larven entwickelt haben … , dann muß sorgfältig jeder Graben, jedes Wasserloch abgesucht werden.« *Gesundheits-Ingenieur, 30. Jg., Nr. 33, S. 542, August 1907*

1907

Multifunktionaler Hometrainer

»Seitdem die Erkenntnis von der Wichtigkeit der rationellen Pflege und Ausbildung des Körpers Gemeingut geworden ist, ist auch eine Anzahl von mehr oder weniger zweckmässigen Vorrichtungen auf den Markt gekommen, die die Körperpflege im Hause ermöglichen sollen. … Ein unter dem Namen ›Vigor‹ auf den Markt gebrachter Apparat … ermöglicht eine grosse Mannigfaltigkeit von Uebungen. … Es können damit … auch Radfahr-, Reit- und sonstige Bewegungen ausgeführt werden, und zwar je nach ihrer Art auch mehrere gleichzeitig. … Der Erfinder selbst, der sich an seinem Apparate ausgebildet hat, besitzt eine auch von Autoritäten angestaunte gleichmässige und selten beobachtete Muskulatur.« *Deutsche Export-Revue, 7. Jg., Nr. 10, S. 465, August 1907*



▲ Der Apparat »Vigor« zur Pflege und Stärkung der Muskeln

Lego mit Molekülen

Mit relativ wenigen molekularen Bauklötzchen, die der Autor und seine Mitarbeiter entwickelt haben, lassen sich Strukturen im Nanometerbereich entwerfen und zusammenfügen – in praktisch jeder gewünschten Form.

Von Christian E. Schafmeister

Proteine sind die Nanomaschinen des Lebens. Als solche haben sie Forscher wie mich, die sich um die Konstruktion von technischen Geräten im Miniaturformat bemühen, schon immer fasziniert. Proteine sind meist sehr große Moleküle aus Hunderttausenden von Atomen und erreichen eine Länge von einigen Dutzend Nanometern (milliardstel Metern). Unser Körper enthält mindestens 20 000 verschiedene Sorten davon. Sie helfen Nahrungsmittel zu verdauen, Knochen aufzubauen, Muskeln zu kontrahieren, unsere Umwelt wahrzunehmen und unermüdlich Hunderte von kleinen Molekülen in unseren Zellen in den Stoffkreislauf zurückzuführen.

Als junger Chemiestudent träumte ich 1986 davon, Makromoleküle (mit mehr als 100 Atomen) zu entwerfen und zu synthetisieren, welche die gleichen faszinierenden Kunststücke wie Proteine vollbringen – und vielleicht noch ein paar mehr. Seit dem Erscheinen der ersten TRS-80-Maschinen Ende der 1970er Jahre habe ich Computer programmiert und mir ausgemalt, wie wunderbar es wäre, komplizierte molekulare Maschinen ebenso leicht aufbauen zu können, wie ich Software schrieb.

Was mir vorschwebte, war eine »Programmiersprache für Materie« – eine Kombination aus Software und Chemie. Der Nutzer müsste nur die Form einer gewünschten Nanomaschine eingeben, und der Rechner würde die Abfolge chemischer Reaktionen ausgeben, mit der ein Chemiker oder Roboter dieses Nanogerät zusammenfügen könnte.

Leider stößt die Idee, künstliche Nanomaschinen auf Proteinbasis zu erzeugen, auf ein ernsthaftes Hindernis. Jedes Protein fängt als einfache lineare Kette von Aminosäuren an, die alle aus einem Fundus von nur zwanzig Standardexemplaren stammen und in einer spezifischen Abfolge aneinandergereiht sind.

So weit, so gut, doch Eigenschaften und Funktionen von Proteinen hängen davon ab, wie sich diese Kette kurz nach ihrer Bildung in der Zelle verknäuelt. Dabei faltet sie sich zu einem kompliziert verschlungenen Gewirr aus schraubenförmigen Spiralen – so genannten Helices – und anderen Strukturelementen. Die Aminosäuresequenz legt zwar im Prinzip die endgültige Form fest, aber die Vorhersage, welche dreidimensionale Gestalt eine Kette mit einer bestimmten Sequenz annehmen wird, ist eines der größten ungelösten Probleme in den Natur- und Ingenieurwissenschaften.

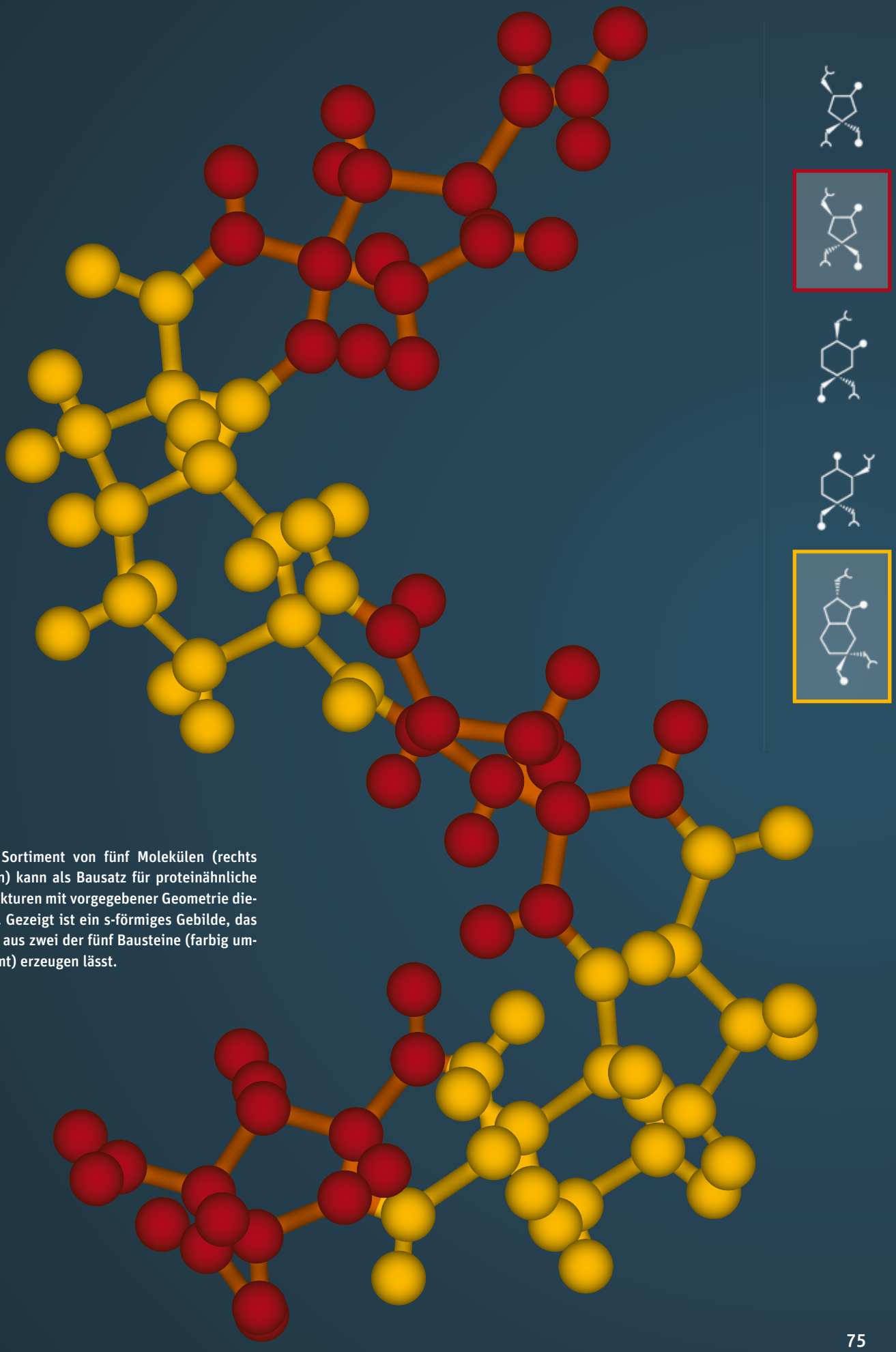
In Kürze

- In Organismen erledigen Proteine als **Nanomaschinen** die verschiedensten Aufgaben. Weil sie aus flexiblen Aminosäureketten bestehen, die sich in sehr komplizierter Weise verknäueln, lässt sich die dreidimensionale Gestalt – und damit Funktion – eines neuen, künstlich erzeugten Exemplars aber nur schwer absehen.
- Der Autor und seine Mitarbeiter haben deshalb andersartige molekulare Einheiten entworfen, die Legosteinen ähneln. Diese **»Bis-Aminosäuren«** lagern sich zu proteinartigen Gebilden mit einer starren Struktur zusammen, die sich gut vorhersagen und planen lässt.
- Solche »Bis-Peptide« hätten **vielerlei Einsatzmöglichkeiten**. Unter anderem könnten sie als Arzneimittel, Katalysatoren, chemische Sensoren, Ventile im Nanometerbereich und Computerspeicher dienen.

Was die Natur uns lehrt

Zwei Jahrzehnte nach meiner damaligen Vision ist ihre Verwirklichung in meinem Laboratorium schließlich gelungen. Meine Mitarbeiter und ich haben eine Methode zur Herstellung großer Moleküle mit programmierbarer Form und auch die Software für ihre gezielte Planung entwickelt. Wir ließen uns dabei vom modularen Aufbau natürlicher Proteine inspirieren, die aus vielfältig kombinierbaren Untereinheiten bestehen. Anders als die flexiblen Aminosäureketten erreichen unsere Moleküle ihre endgültige Gestalt aber nicht dadurch, dass sie sich verknäueln. Auf diese Weise umgehen wir das ungelöste Protein-Faltungsproblem.

Mit dem von uns entwickelten Verfahren möchten wir letztlich Moleküle erzeugen, die spezifische Aufgaben erledigen oder Funktionen ausüben können. Zunächst einmal denken wir dabei an Sensoren, die Form und Farbe ändern, wenn sie sich an bestimmte Zielmoleküle wie Glukose, Toxine oder chemische Kampfstoffe anlagern. Beim Andocken schwingen im Sensormolekül zwei fluoreszierende Gruppen aufeinander zu. Die resultierende Farbänderung signali- ▷



Ein Sortiment von fünf Molekülen (rechts oben) kann als Bausatz für proteinähnliche Strukturen mit vorgegebener Geometrie dienen. Gezeigt ist ein s-förmiges Gebilde, das sich aus zwei der fünf Bausteine (farbig umrahmt) erzeugen lässt.

KEN EWARD, BIOGRAFX

▷ siert dann die Anwesenheit des Zielmoleküls in der Probe.

Ein weiteres Vorhaben ist die Schaffung langer, scharnierartiger Moleküle, welche auf ein externes Signal hin auf- oder zuklappen – ein Schritt in Richtung molekularer Regelelemente, Ventile und Computerspeicher.

Als Fernziel wollen wir unser Verfahren so weit verfeinern, dass sich damit komplexe Nanowerkzeuge anfertigen lassen, die ähnlich den Ribosomen, welche innerhalb der Zelle die Synthese von Proteinen bewerkstelligen, unter externer Programmsteuerung andere Nanaomaschinen zusammenbauen. Das ist unsere neue Zukunftsvision.

Als ich 1990 mein Grundstudium beendet hatte, sah ich den Weg zu Nanomaschinen darin, die Regeln der Proteinfaltung zu entschlüsseln, um so Proteine mit gewünschter Struktur erzeugen zu können. Ich schloss mich daher Robert M. Stroud und seinen Mitarbeitern an der Universität von Kalifornien in San Francisco an, die Proteinkristalle züchten und mit Röntgenstrahlung beschießen, um aus dem Streumuster die dreidimensionale Anordnung der Atome abzuleiten.

Dank dieser Methode lernte ich, die Komplexität und die Schönheit von Proteinstrukturen zu würdigen. Ich verbrachte vier Jahre damit, einen von mir erdachten künstlichen Eiweißstoff namens 4HBI zu erzeugen. Zuerst baute ich ein künstliches Gen zusammen und brachte es in Bakterien ein, die es »exprimierten« – also das in seiner DNA kodierte Protein erzeugten. Als Nächstes kristallisierte ich das erhaltene Molekül und bestimmte per Röntgenbeugung seine dreidimensionale Struktur. Das Aufregende daran war: Es hatte tatsächlich die von mir geplante Form!

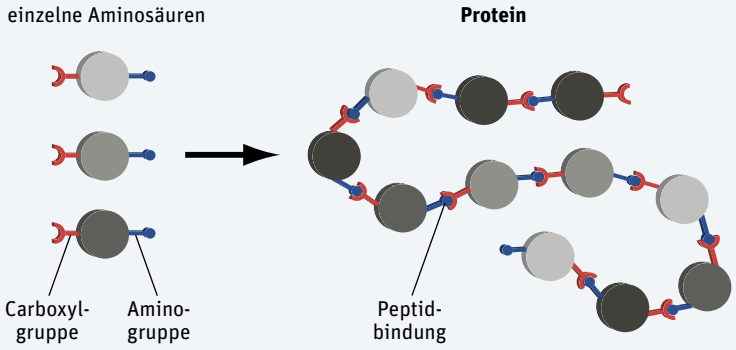
Anfang bei null

Doch trotz des Erfolgs nach all dieser Mühe erwies sich 4HBI als Sackgasse. Es war eben nur ein künstliches Protein mit definierter Faltung, sonst nichts. Am meisten enttäuschte mich, dass ich aus meinem gelungenen Experiment keineswegs die erhofften einfachen Regeln für die Planung anderer Eiweißstoffe mit gewünschter Form ableiten konnte. Im Gegenteil, ich musste feststellen, dass es angesichts der Komplexität der Proteinfaltung solche einfachen Regeln wohl gar nicht gibt.

Was Bis-Peptide von Proteinen unterscheidet

Natürliche Proteine

Organismen benutzen im Allgemeinen ein Sortiment aus zwanzig verschiedenen Aminosäuren: Kohlenstoffverbindungen, die eine Carboxyl- und eine Aminogruppe enthalten (wobei eine der beiden Gruppen jeweils auch doppelt vorkommen kann). Diese Aminosäuren werden zu flexiblen Ketten verknüpft, die bei geringer Länge Peptide und sonst Proteine heißen. Zur Verknüpfung dienen Peptidbindungen, die entstehen, wenn eine Carboxyl- und eine Aminogruppe sich unter Abspaltung von Wasser zu einem so genannten Amid verbinden. Über die endgültige Form eines Proteins entscheidet ein komplexes Zusammenspiel der Wechselwirkungen zwischen allen Aminosäuren der Kette. Wegen dieser Komplexität ist es äußerst schwierig vorherzusagen, welche dreidimensionale Gestalt ein Protein mit bestimmter Aminosäuresequenz einnehmen wird. (Alle Moleküle sind der Übersichtlichkeit halber stark schematisch gezeichnet.)



Bei Abschluss meiner Doktorarbeit im Jahr 1997 ließ ich deshalb meinen ursprünglichen Plan fallen und fasste einen neuen. Man müsste, so meine Schlussfolgerung, zur Konstruktion von Nanomaschinen mit vorgegebenen Eigenschaften molekulare Komponenten einsetzen, die ein weniger flexibles Gerüst ergeben, das seine Endform nicht über die Mechanismen der Proteinfaltung erlangt.

Das war allerdings keine ganz neue Idee. Schon 1995 hatte Brent Iverson von der Universität von Texas in Austin Bausteine entwickelt, die sich zu kurzen Polymeren verketten lassen. Da diese »Oligomere« so genannte Donor- und Akzeptor-Gruppen enthielten, die reich beziehungsweise arm an Elektronen sind und einander deshalb anziehen, lagerten sie sich von allein zu stapelartigen Gebilden mit vorhersagbarer Struktur zusammen.

Etwa zur gleichen Zeit entwarfen Sam Gellman an der Universität von Wisconsin in Madison und Dieter Seebach an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich synthetische Moleküle aus Beta-Aminosäuren, die sich von den natürlich vorkommenden Alpha-Aminosäuren geringfügig im Aufbau unterscheiden. Die aus ihnen gebildeten Beta-Peptide falten sich in der Regel vorhersehbar zu schraubenförmigen Helices.

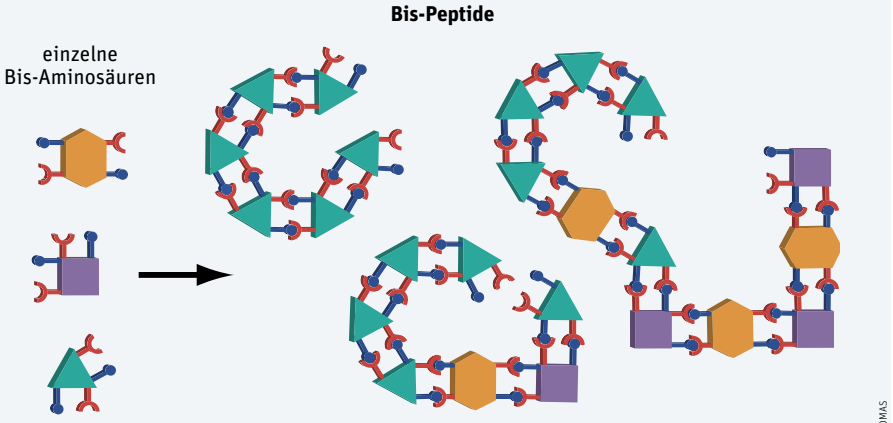
So inspirierend ich diese beiden Verfahren zum Aufbau von Makromolekülen mit spezifischer Struktur fand, schienen sie mir das altbekannte Faltungsproblem aber nur durch ein anderes zu ersetzen. Die Schwierigkeit liegt darin, dass die neuen Moleküle ebenso wie natürliche Proteine ein »Rückgrat« enthalten, dessen Atome über frei drehbare Einfachbindungen verknüpft sind. Dadurch hat die Kette jede Freiheit, sich auf der ganzen Länge zu verwinden und zu biegen. Wie sie das letztlich tut, hängt vom komplexen Zusammenspiel anziehender und abstoßender Kräfte ab, die auftreten, wenn die einzelnen Kettenbausteine einander näher kommen.

Mir schwebte ein radikalerer Ansatz vor: Ich wollte den üblichen Faltungsprozess nicht nur einschränken, sondern völlig ausschließen, um mehr Kontrolle über die Form des Endprodukts zu gewinnen.

Deshalb begann ich, mir starre Bausteine auszudenken, die sich über zwei Bindungen statt nur einer einzigen zu

Vorhersagbare Bis-Peptide

Das Forschungsteam um den Autor hat eine Bibliothek aus Bausteinen produziert, welche die Carboxyl- und Aminogruppe doppelt enthalten. Bei der Verknüpfung dieser »Bis-Aminosäuren« entstehen deshalb gleich zwei Peptidbindungen. Das führt zu einer starren Kette – einem so genannten Bis-Peptid – mit einer vorhersagbaren Form, die direkt durch die Sequenz der gewählten Bausteine bestimmt wird. Deshalb können Chemiker gewünschte Nanostrukturen einfach durch Kombination von Bis-Aminosäuren in einer bestimmten Reihenfolge planen und aufbauen.



MELISSA THOMAS

steifen, leiterartigen Makromolekülen zusammenfügen ließen. Als Vorbild dienten mir Arbeiten von J. Fraser Stoddart, der nach diesem Prinzip schon 1987 an der Universität Sheffield (England) einen »molekularen Lego-Bausatz« zusammengestellt und damit molekulare Gürtel und Kragen erzeugt hatte.

Angesichts dieses Vorhabens wechselte ich an das Laboratorium von Gregory Verine an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), um synthetische organische Chemie zu lernen. Nachdem ich mich dort zwei Jahre mit der Herstellung von Aminosäuren beschäftigt hatte, ohne einen Weg zur Verwirklichung meiner neuen Vision zu finden, fiel mir ein Artikel über eine Verbindung namens Diketopiperazin in die Hände. In diesem Molekül bilden sechs Atome einen Ring, der zwei Amidgruppen (–CO–NH–) enthält. Genau über solche Gruppen sind die Aminosäuren in Proteinen zu einem Strang verknüpft – wie bei Menschen, die eine Kette bilden, indem sie sich an den Händen halten. Ein Diketopiperazin-Ring entsteht, wenn zwei Aminosäuren so zusammenkommen wie zwei Personen, die sich an beiden Händen fassen.

Auf Proteinsynthesen spezialisierte Chemiker kennen etliche elegante Reaktionen zum Knüpfen von Amidbindungen (auch Peptidbindungen genannt) zwischen Aminosäuren und sind mit dem Diketopiperazin-Ring gleichfalls bestens vertraut; denn er kann sich unerwünscht bilden und dadurch die Proteinsynthese stören. Mir kam jedoch die Idee, gerade diese unerwünschte Reaktion zur Verkettung meiner Baussteine zu nutzen.

Molekularer Ringelreigen

Im Bild der Händchen haltenden Aminosäuren bestehen die beiden Hände aus kleinen Atomverbänden, die Chemiker als Amino- ($-NH_2$) und Carboxylgruppe (–COOH) bezeichnen. Stellen Sie sich die eine als die linke und die andere als die rechte Hand vor. Ergreift nun eine linke Hand eine rechte, kommt es zu einer Amidbindung.

Allerdings wollte ich kein molekulares Gegenstück einer einfachen Menschenkette erzeugen – die entspricht ja den gewöhnlichen Aminosäuresträngen der Proteine. Vielmehr wollte ich meine Bausteine über jeweils zwei Bindungen miteinander verknüpfen. Wie müssten sie dazu aussehen? Die Antwort ist nicht schwer. Stellen Sie sich einfach zwei Menschen vor, die zum Beispiel Rücken an Rücken zusammengebunden sind und die Arme von sich strecken. Ein solches Menschenpaar könnte mit einem anderen in der Reihe Kontakt aufnehmen, indem eine der zwei zusammengebundenen Personen beide Hände von einer Person des benachbarten Paars ergreift – wodurch das Analogon einer Diketopiperazin-Bindung entsteht.

Auf die Chemie übertragen, entspricht jedem Menschenpaar ein starres, hauptsächlich aus Kohlenstoffatomen bestehendes Molekül, an dem sich auf gegenüberliegenden Seiten je eine Amino- und eine Carboxylgruppe als linke und rechte Hand befinden. De facto handelt es sich dabei um eine Bis-Aminosäure (nach lateinisch bis = doppelt).

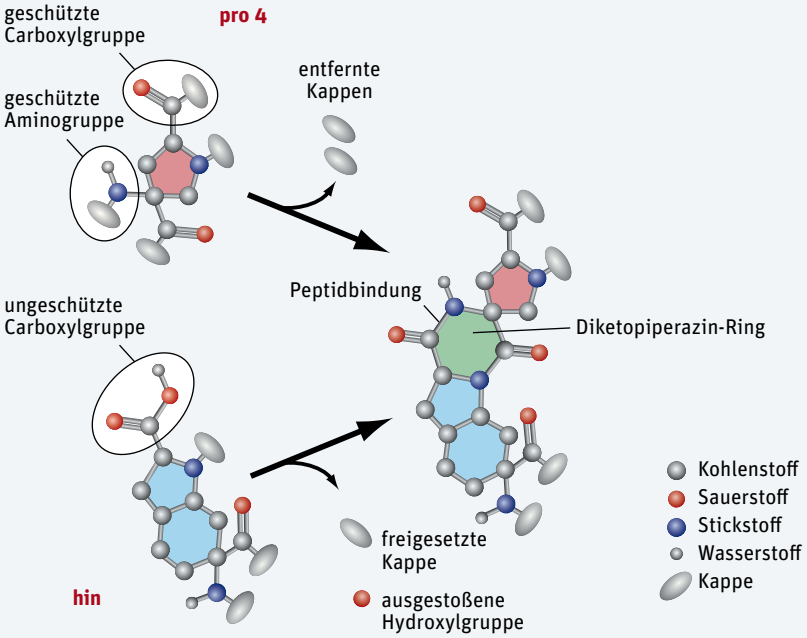
Zwei solche Bausteine oder »Monomere«, wie Chemiker sagen, können sich nun mit beiden Händen fassen, indem sie zwei Amidbindungen aus je einer Amino- und Carboxylgruppe knüpfen und dabei einen Diketopiperazin-Ring bilden. Das Reaktionsprodukt vermag sich auf analoge Weise auf beiden Seiten mit weiteren Monomeren zu verbinden. Da Biochemiker kurze Aminosäureketten als Peptide bezeichnen, nenne ich meine so entstehenden Ketten analog Bis-Peptide.

Mit den Rohentwürfen für ein Sortiment von brauchbaren Monomeren in der Hand wechselte ich daraufhin zur Universität Pittsburgh (Pennsylvania) und gründete dort ein neues Laboratorium, um zusammen mit Doktoranden die synthetische Chemie zur Realisierung meiner Idee zu entwickeln. Binnen zwei Jahren hatte mein Mitarbeiter Christopher Levins die ersten Bis-Aminosäuren synthetisiert. Seine Ausgangssubstanz war Hydroxyprolin, eine kommerziell erhältliche Aminosäure aus Kollagen – dem Protein, das Knorpeln, Bändern und Sehnen ihre Festigkeit verleiht; eine andere Forschergruppe hatte aus dieser Verbindung früher schon Moleküle hergestellt, die unseren Monomeren im Aufbau recht nahekamen.

Nach einem neun Schritte umfassenden Syntheseplan, den Levins mit mir zusammen ausgearbeitet hatte, erzeugte er aus Hydroxyprolin vier verschiedene Bausteine, die wir pro4(2S4S), pro4(2S4R), pro4(2R4S) und pro4(2R4R) nannten. Der Namensbestandteil »pro4« rührt da- ▷

Wie man Moleküle starr verbindet

Damit die Bis-Aminosäuren nicht unkontrolliert Bindungen miteinander eingehen, werden sie zunächst teilweise mit Kappen (grau) als Schutzgruppen versehen. Bei ihrer gezielten Verknüpfung vereinigen sich zwei von ihnen – etwa pro4 und hin, deren chemische Strukturen links dargestellt sind – in mehreren, hier nicht gezeigten Schritten unter Bildung eines Diketopiperazin-Rings (grün). Dieser ist ebenso starr wie die anderen Kohlenstoff-Ringe in den Bis-Aminosäuren. Dadurch ergibt sich eine steife Kette mit voraussagbarer Form. (Einige Wasserstoffatome und Details der Schutzgruppen wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.)



MELISSA THOMAS

▷ her, dass alle Monomere der Aminosäure Prolin ähneln, wobei eine zusätzliche Aminosäure an ein Kohlenstoffatom gebunden ist, das nach der konventionellen Abzählmethode der organischen Chemiker die Nummer 4 trägt. Die Buchstaben R und S geben die Orientierung der Gruppen an diesem Kohlenstoffatom und einem weiteren mit der Nummer 2 an. Alle vier Monomere liegen als Pulver vor, das bei Raumtemperatur monatelang stabil bleibt.

Unermessliche Formenvielfalt

Zur Synthese von Bis-Peptiden hängen wir die Bausteine – also die Bis-Aminosäuren – zunächst in der gewünschten Reihenfolge mittels Einzelbindungen aneinander; erst danach knüpfen wir auch die zweite Bindung und geben dem Molekül so seine endgültige, starre Form. Indem wir einzelnen Amino- und Carboxylgruppen gezielt schützende »Käppchen« verpassen, sorgen wir dafür, dass sich bei den verschiedenen Schritten keine unerwünschten Amidbindungen bilden können.

Auf diese Weise erzeugte Levins kurze Bis-Peptide aus seinen pro4-Monomeren (Kasten auf der rechten Seite). Beim ersten Teil der Synthese nahm er ein Trägermaterial zu Hilfe. Es besteht aus Plastikkügelchen mit Aminogruppen auf der Oberfläche. Diese fixieren jeweils das erste Monomer, indem sie mit einer seiner beiden Carboxylgruppen – die andere ist ebenso wie die zwei Aminogruppen dieser Bis-Aminosäure geschützt – eine Amidbindung bildet. Ein Überschuss an Baustein-Molekülen stellt dabei sicher, dass praktisch keine freie Aminogruppe auf den Kügelchen übrig bleibt.

Durch Spülen des Trägermaterials mit einem Lösungsmittel werden die überzähligen Monomere entfernt. Kurzes Waschen mit einer Base löst anschließend das Käppchen von einer der beiden Aminogruppen des an die Kügelchen gehängten ersten Bausteins (die beiden Amine tragen verschiedene Kappen, die sich selektiv abtrennen lassen). Nun gibt man den zweiten Baustein zu, der sich wiederum mit seiner ungeschützten Carboxyl- an die freie Aminogruppe des ersten bindet. Als Nächstes wird die Kappe von einer seiner Aminogruppen entfernt und der dritte Baustein zugefügt – und so weiter.

Dieses schrittweise Zusammenbauen braucht seine Zeit, weil man nach Zugabe eines Monomers jeweils etwa eine Stunde warten muss, bis so gut wie alle freien Aminogruppen sich ihr Bausteinmolekül geschnappt haben. Zum Glück können Roboter, die für die Peptidsynthese entwickelt wurden, die eintönige Arbeit automatisch erledigen und dabei viele Sequenzen gleichzeitig erzeugen.

Wenn eine Kette fertig ist, lösen wir sie mit einer starken Säure vom Kügelchen ab. Anschließend entfernen wir die schützende Kappe von der zweiten Aminogruppe in jedem Kettenbaustein. Diese attackiert dann bei Zugabe einer basischen Lösung die Carboxylgruppe des vorangegangenen Monomers, verdrängt dessen Schutzhaube und bildet eine weitere Amidbindung mit ihm. Indem benachbarte Bausteine dadurch doppelt miteinander verknüpft werden, bekommt das gesamte Molekül eine starre Gestalt, die wohldefiniert und vorhersagbar ist.

Wie sich herausstellte, sind die so fabrizierten Bis-Peptide in Wasser und anderen polaren Flüssigkeiten löslich. Dadurch lassen sie sich leicht untersuchen und möglicherweise zum Aufbau neuer Arzneimittel nutzen, die sich im Blut auflösen und verteilen müssen.

Die Bis-Aminosäuren, aus denen unsere Bis-Peptide bestehen, kann man sich als mehr oder weniger verformte Legosteine vorstellen, bei denen die Oberseite mit den Knöpfen gegenüber der Unterseite mit den Löchern geneigt und verdreht ist. Auch sie lassen sich stapeln. Allerdings entsteht in diesem Fall nicht ein gerader, senkrechter Turm, sondern ein schiefes, gekrümmtes Gebilde, wobei Art und Ausmaß der Krümmung von der gewählten Bis-Aminosäure abhängen.

Die erreichbare Vielfalt ist enorm: x Bausteine n verschiedener Typen kann man auf n^x unterschiedliche Arten zusammensetzen und entsprechend viele Formen erzeugen – allein etwa eine Million (4^{10}) bei einem zehn Blöcke langen Bis-Peptid aus unseren vier pro4-Monomeren. Je mehr verschieden geformte Bausteine zur Verfügung stehen, desto

genauer lässt sich ein Makromolekül mit gewünschter Gestalt zusammenbauen. Die Herausforderung besteht dann darin, die dazu nötigen Sequenzen zu ermitteln.

Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Größe jedes Legosteins sowie der Neigung und Verdrillung der Knöpfe auf der Ober- gegenüber den Löchern auf der Unterseite. Diese Information sollte zur Basis unserer »Programmiersprache für die Materie« werden. Allerdings lässt sie sich an den Monomeren selbst nur schlecht ermitteln. Stattdessen vermaßen wir unsere ersten Bis-Peptide, um festzustellen, in welchem Winkel sich die Bauklötzchen aneinanderfügen.

Nanostrukturen aus dem Computer

Als Methode benutzten wir unter anderem die kernmagnetische Resonanz. Sie zeigt, welche Wasserstoffatome in einem Bis-Peptid räumlich nahe beieinanderliegen. Zusätzlich bestimmten wir mit anderen Methoden die Orientierungen der Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen.

Aus diesen Messergebnissen konnten wir die gewünschten Daten über die Form der jeweiligen Legosteine ableiten. Mit deren Hilfe schließlich schufen wir ein CAD-Programm namens Cando (*computer aided nanostructure design and optimization*, computergestützte Planung und Optimierung von Nanostrukturen) für den Aufbau von Bis-Peptiden.

Gregory Bird, ein weiterer Doktorand in meiner Gruppe, entwarf damit molekulare Stäbe und gekrümmte Strukturen und baute diese Gebilde kürzlich zusammen. Dabei heftete er an den Anfang und das Ende jeweils eine so genannte Spinsonde, um zu überprüfen, ob die Syntheseprodukte im Reagenzglas mit dem im Computer geplanten Molekül übereinstimmten. In der Tat zeigten bestimmte Abfolgen von pro4(2S4S)- und pro4(2R4R)-Bausteinen die von Cando vorhergesagten Formen der Buchstaben C und S (siehe Grafik S. 80).

Die pro4-Bis-Aminosäuren ähneln Legosteinen, deren gegenüberliegende Seiten relativ wenig gegeneinander gekippt sind. Dadurch lassen sich stabförmige und leicht gekrümmte Strukturen daraus herstellen, die als Verstrebungen dienen könnten, um chemische Gruppen auf bestimmtem Abstand voneinander zu halten. Viele Proteine erlangen ihre besonderen Fähigkeiten jedoch dadurch, dass sie über Hohlräume verfügen, die gewöhnlich als Bindungstaschen bezeichnet werden. Sie können Moleküle darin aufnehmen und deren Reaktionen katalysieren oder sich damit spezifisch an zapfenartige Zielstrukturen anlagern.

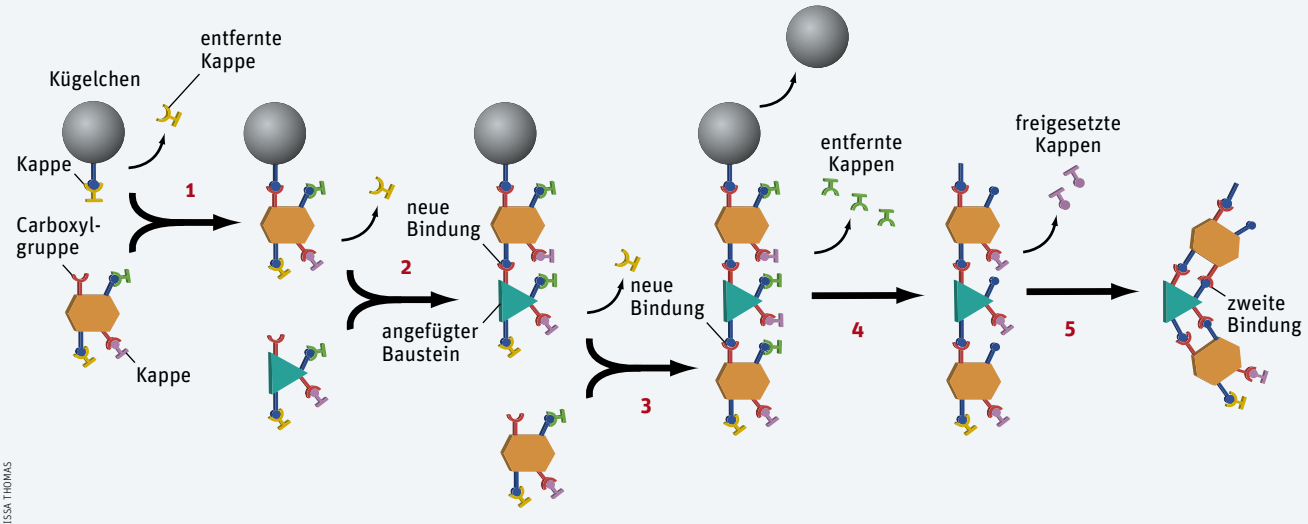
Um kompakte Bis-Peptide mit solchen Hohlräumen zu erzeugen, mussten wir unseren Fundus an Bausteinen erweitern. Mein Student Stephen Habay ging den ersten Schritt in diese Richtung, indem er eine Bis-Aminosäure entwickelte – wir nennen sie »hin« –, die einen deutlichen Knick in einem Bis-Peptid erzeugt.

Inzwischen ist unsere Monomer-Sammlung auf 14 Stück angewachsen. Nach Berechnungen mit Cando sollte sie ausreichen, um kompakte Bis-Peptide mit Hohlräumen zu erzeugen – gäbe es da nicht ein Problem. Während die Reaktion, welche die zweite Amidbindung bildet und das Gerüst versteift, zwischen den pro4-Monomeren relativ schnell abläuft, erwies sie sich bei allen neuen Bausteinen als unerwartet träge. Zwar konnten wir die Reaktionsgeschwindigkeit durch Erhitzen steigern, aber dabei gerieten die resultierenden Strukturen durcheinander. Dieses Problem erwies sich als gravierendes Hindernis für die Synthese größerer und komplexerer Bis-Peptide.

Indem mein Student Sharad Gupta das Verfahren zum Knüpfen der zweiten Amidbindung modifizierte, konnte er diese Schwierigkeit teilweise überwin- ▷

Bauanleitung für Bis-Peptide

Ausgangspunkt der Synthese eines Bis-Peptids ist ein Kügelchen mit einer geschützten Aminogruppe. An diese dockt nach Entfernen der Kappe (gelb) die erste Bis-Aminosäure über ihre freie Carboxylgruppe an (1). Der Vorgang wird mit weiteren Bis-Aminosäuren wiederholt (2 und 3). So entsteht eine über Einzelbindungen verknüpfte Kette. Diese löst man vom Kügelchen ab und entfernt alle verbliebenen Kappen (grün) von den noch ungebundenen Aminogruppen (4). Mit diesen reagieren nun die restlichen Carboxylgruppen unter Freisetzung der Schutzhauben und bilden so die zweite Bindung zwischen den Bausteinen.



MELISSA THOMAS

▷ den. Er ersetzte in den Monomeren die Kappe an der Carboxylgruppe durch eine, die vom Amin leichter abgespalten wird. Außerdem führte er, inspiriert durch einen Artikel aus den 1970er Jahren, Essigsäure als Katalysator ein. Die Kombination von Wärme und Säure beschleunigte die Ringschlussreaktion, ohne die Struktur durcheinanderzubringen, wie das bei Temperaturerhöhung und Zusatz einer Base geschehen war.

Wir verbrachten sechs Monate damit, jene optimale Kombination von Ester, Schutzgruppe, Lösungsmittel und Temperatur zu finden, die wir seither verwenden. Trotzdem müssen wir das Problem irgendwann noch einmal anpacken; denn unsere derzeitige Lösung funktioniert für Sequenzen mit mehr als fünf Monomeren nicht besonders gut.

Vorerst konzentrieren wir uns jedoch darauf, Anwendungen für diejenigen Bis-Peptide zu finden, die sich mühelos herstellen lassen. Das sind solche von beliebiger Länge, wenn nur pro4-Monomere darin vorkommen, und Exemplare aus maximal fünf Monomeren bei anderen Ausgangsmaterialien.

Hemmstoff gegen Cholera

Als eine der ersten Einsatzmöglichkeiten für unsere Bis-Peptide prüften wir, ob sich eines davon fest an das Cholera-Toxin (Ctx) heften und es so blockieren könnte. Der Giftstoff des Durchfallbakteriums hat fünf identische Hohlräume, je einen an den Ecken eines regulären Fünfecks. Damit kann er das Gangliosid GM1 (einen Fettstoff mit angehängter Zuckerkette) binden; denn es enthält eine Struktur, die sehr gut in die pentagonale Anordnung der Hohlräume passt. Die Epithelzellen, die den Dünndarm auskleiden, tragen GM1 auf ihrer Oberfläche, und wenn Ctx sich daran anlagert, löst das eine Kette von Vorgängen aus, die zu der lebensbedrohlichen Durchfallerkrankung führen. Moleküle, die sich an die Hohlräume des Toxins heften, könnten es daran hindern, an menschlichen Zellen anzudocken, und so den Krankheitsverlauf stoppen.

Andere Wissenschaftler haben kleine Zuckermoleküle entwickelt, die sich einzeln an die Hohlräume anlagern. Aber diese Wirkstoffe funktionieren nicht gut, weil sie nicht sehr fest am Ctx haften und mit den fünf gleichzeitigen Bindungen, die das Toxin mit GM1 auf menschlichen Zellen eingeht, nicht konkurrieren können. Uns schwebte ein Gebilde vor, das in zwei der Hohlräume auf einmal ein Zuckermolekül steckt.

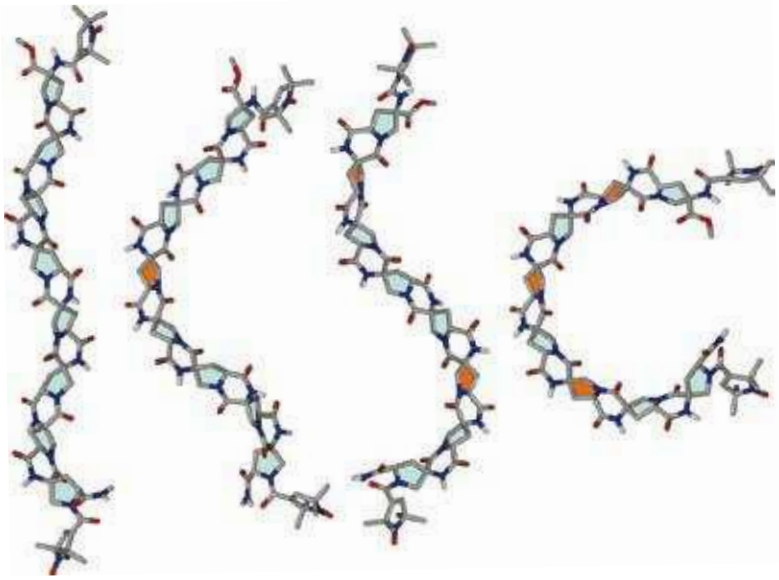
An den Enden unserer Bis-Peptide lassen sich fast beliebige andere Gruppen anbringen. Also nahmen wir ein stabförmiges Exemplar, dessen Länge gerade dem Abstand von zwei benachbarten Hohlräumen im Ctx-Protein entspricht, und versahen es an beiden Seiten mit kleinen Zuckermolekülen. Tatsächlich hafteten diese Bis-Peptide fester an Ctx als die Zuckermoleküle allein, und die Bindung war mindestens so gut wie die der natürlichen GM1-Einheit.

Wir konnten jedoch bisher nicht feststellen, ob sich unser Hemmstoff, wie gewünscht, an zwei Hohlräume auf einem Ctx anlagert oder ob er sich an je einen auf verschiedenen Toxin-Molekülen heftet und diese somit vernetzt. Dann wäre er schlecht als Medikament zur Bekämpfung von Cholera geeignet, weil er nur bei Menschen funktionieren würde, die schon eine große – wahrscheinlich tödliche – Menge des Bakterientoxins im Körper haben; bei geringen Ctx-Mengen hätte ein Bis-Peptid, das bereits mit einem Ende an einem Hohlraum auf einem Toxin-Molekül haftet, kaum eine Chance, einen zweiten Bindungspartner zu finden.

Die Vernetzung von Proteinen auf der Oberfläche von Viren erscheint dagegen Erfolg versprechend. Deshalb arbeiten wir nun an Bis-Peptiden, die nach diesem Muster Erreger wie HIV und den Verursacher von Ebola bekämpfen.

Außer starren Stäben mit Anhängseln an den Enden haben wir molekulare Aktuatoren entwickelt, in denen zwei Stäbe über ein Scharnier verbunden sind. Dabei handelt es sich um Vorrichtungen, die auf ein Signal hin eine Bewegung ausführen. Unsere Aktuatoren sind so konstruiert, dass sie normalerweise aufgeklappt vorliegen und sich schließen, wenn die Gruppen am äußeren Ende der Stäbe ein Metallion oder ein kleines Molekül binden. In einer ersten Version, die meine Studentin Laura Velasco gebaut hat, bestehen die Stäbe aus vier Monomeren; als Scharnier fungiert eine gewöhnliche Aminosäure, und ein Metallion sorgt für das Auf- und Zuklappen.

Eine Anwendung wäre ein molekulares Ventil, in dem die Stäbe mit einem Ende an der Wand eines nanometerbreiten Lochs befestigt sind und in dieses hineinragen (Kasten auf der rechten Seite). Im gestreckten Zustand würden sie den Durchgang blockieren, im gefalteten dagegen den Weg freigeben. Solche Ventile ließen sich für eine Vorrichtung verwenden, die eine Messgröße bei einem Patienten überwacht und im Bedarfsfall einen geeigneten Wirkstoff freisetzt. Das Auf- und Zuklappen wäre elektrochemisch steuerbar – mit Gruppen an den



CHRISTIAN E. SCHAFMEISTER

Diese Beispiele von Bis-Peptiden, synthetisiert von der Gruppe des Autors, zeigen eine Auswahl möglicher Formen. Eine Kette aus einer als pro4(2R4R) bezeichneten Bausteinsorte (hellblau) schlängelt sich nur leicht (links). Durch Einfügen von einer oder mehreren Einheiten einer anderen Bis-Aminosäure namens pro4(2R4S) (orange) lässt sich die Krümmung verstärken, sodass Gebilde in Form eines C sowie eines S entstehen.

Stabenden, die sich bei einer bestimmten Spannung zusammenlagern.

Ein Wald von Stäben mit Scharnieren, die auf diese Weise einzeln regulierbar sind, ließe sich auch als Computerspeicher einsetzen. Die Spitze eines Kraftfeldmikroskops könnte die Reihen in diesem Wald scannen und festellen, welche Stäbe aufrecht stehen und die Binärziffer 1 symbolisieren – ähnlich werden in dem experimentellen »Tausendfüßler«-Laufwerk von IBM die Zustände »Loch« oder »Nicht-Loch« bestimmt (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 90). Ein Bit in Lochform zu löschen ist jedoch schwierig. Bei uns müsste nur der Stab zusammengeklappt werden.

Kombination aus Chemie und Software

Die Seitenketten der zwanzig natürlich vorkommenden Aminosäuren tragen eine Vielzahl chemischer Gruppen. Diese sind in Proteinen so angeordnet, dass sich eine dreidimensionale Struktur ergibt, die dank ihrer Form und sonstigen Eigenschaften chemische Reaktionen beschleunigen, kleine Moleküle binden oder viele andere Funktionen ausüben kann. Analog entwickeln wir in unseren Laboratorien Legosteine, die zusätzliche chemische Gruppen tragen, mit denen folglich auch die daraus zusammengesetzten Bis-Peptide an ihrem leiterartigen Rückgrat bestückt sind.

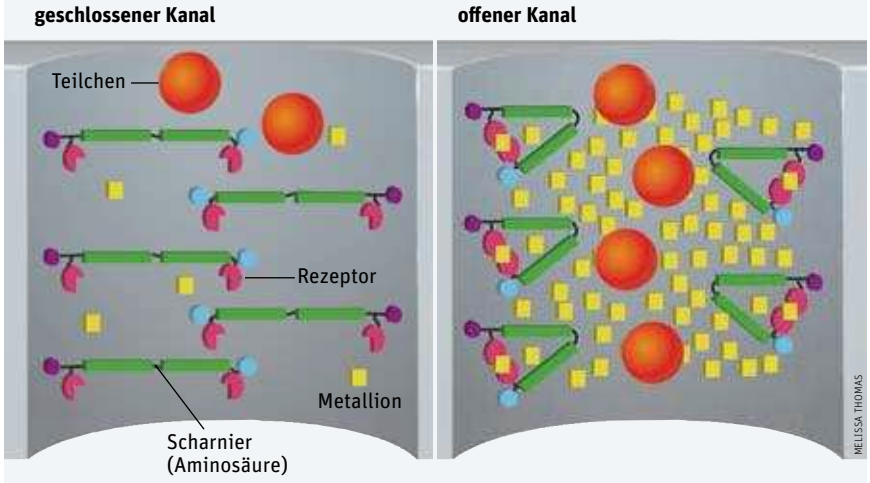
Das erste solche Monomer haben wir schon hergestellt. Unser Ziel ist die Synthese von Makromolekülen mit der gleichen Anordnung chemischer Gruppen wie in den katalytisch aktiven Zentren von Enzymen. Von da bis zu Designer-Enzymen wäre es dann nur noch ein kleiner Schritt.

Vor meinem geistigen Auge sehe ich in zwanzig Jahren Dutzende emsiger Entwicklerteams rund um den Globus, die auf der Basis von Bis-Peptiden passgenaue Makromoleküle entwerfen und lernen, künstliche Enzyme sowie andere nützliche molekulare Vorrichtungen zu bauen. Die Synthese einiger aussichtsreicher Mittel gegen Krebs wie Halichondrin-B und Bryostatin ist derzeit sehr schwierig und kostspielig. Andererseits können die Schwämme und Meeresorganismen, die diese Verbindungen produzieren, den Bedarf bei Weitem nicht decken. In zwanzig Jahren gelingt es uns vielleicht, künstliche Enzyme zu fabrizieren, die diese und andere wertvolle Verbindungen in preiswerter und umweltfreundlicher Weise produzieren. Man stelle sich vor, wie es wäre, einen Tropfen einer Lösung künstlicher Enzyme in ein Fass mit stark fruktosehaltigem Maissirup zu geben und wenige Tage später kiloweise Bryostatin daraus zu isolieren! Auch wenn sich synthetische Enzyme herstellen ließen, die durch Abbau pflanzlicher Zellulose oder mittels Sonnenlicht aus Wasser und Kohlendioxid Ethanol erzeugen, wäre das ein Riesengewinn für die Menschheit.

Meine Mitarbeiter und ich haben eine Kombination aus Chemie und Software zur Herstellung von Makromolekülen mit programmierbarer Form entwickelt. Da die Synthese von Bis-Peptiden nur ein paar Tage dauert, können wir innerhalb von Wochen beliebige Exemplare entwerfen und zusammenbauen, ihre Eigenschaften testen und die nächste Generation von Substanzen modellieren. Die große Herausforderung für die kommenden Jahre wird darin bestehen, sich eine sinnvolle Funktion auszudenken und zu lernen, welche Abfolge von Monomeren ein Bis-Peptid ergibt, das sie am besten erfüllt. ◁

Nanoventile

Ventile mit einem Durchmesser von nur drei Nanometern, die sich mit Hilfe von Bis-Peptid-Aktuatoren öffnen und schließen lassen, befinden sich derzeit im Entwurfsstadium. Die Regelelemente wurden schon synthetisiert und erprobt. Sie bestehen aus zwei kurzen Bis-Peptid-Stäben (grün), die durch eine Aminosäure als Scharnier verbunden sind. Bei geringer Konzentration des Metallions (gelb), das den Mechanismus auslöst, ragen sie von den Rändern kleiner, durch eine Aluminiumscheibe gebohrter Löcher (grau) nach innen, sodass größeren Partikeln oder Molekülen (orange) der Durchlass verwehrt ist (oben). Bei hohen Konzentrationen heften sich die Ionen an Rezeptoren (rot) an den Enden der Bis-Peptide, wodurch diese zusammenklappen und den Kanal freigeben (unten).



Christian E. Schafmeister ist Chemieprofessor an der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) und Mitglied der Arbeitsgruppe, die für das Foresight Nanotech Institute in Palo Alto (Kalifornien) einen Fahrplan für die Realisierung produktiver Nanosysteme erstellt. Er hat 1997 an der Universität von Kalifornien in San Francisco promoviert und danach an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) eine neue Methode entwickelt, Peptide resistenter gegen den Abbau durch Proteasen zu machen, was ihre Eignung als Medikamente verbessert.

Flexibility and lengths of bis-peptide nanostructures by electron spin resonance. Von S. Pornsuwan et al. in: Journal of the American Chemical Society, Bd. 128, Nr. 12, S. 3876, 29. 3. 2006

The synthesis of curved and linear structures from a minimal set of monomers. Von C. G. Levins und C. E. Schafmeister in: Journal of Organic Chemistry, Bd. 70, S. 9002, 2005

A field guide to foldamers. Von D. J. Hill et al. in: Chemical Reviews, Bd. 101, Nr. 12, S. 3893, Dezember 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893109.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Das Urlauberdilemma

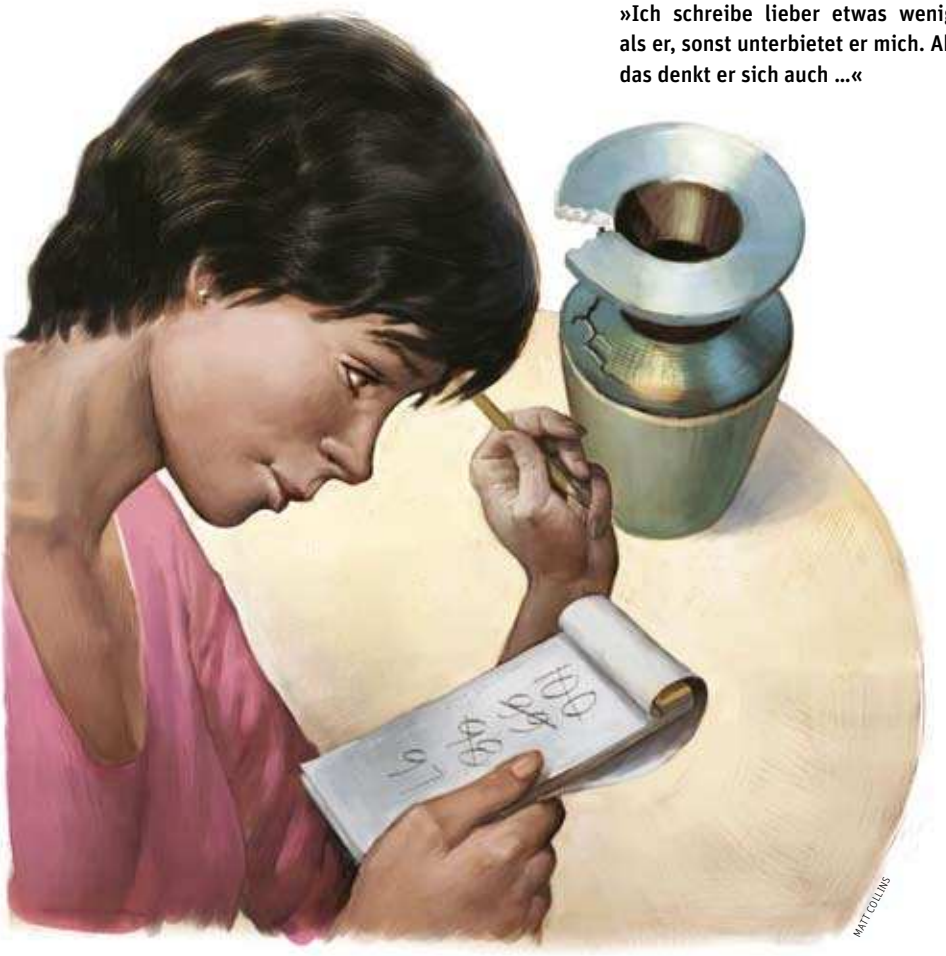
Bei diesem einfachen Spiel handeln die Menschen konsequent dem zuwider, was die Theorie »rational« nennt – und erzielen gerade durch ihr irrationales Verhalten größere Gewinne. Ein solch paradoxes Ergebnis schreit förmlich nach einer neuen Theorie.

Von Kaushik Basu

Tanja und Markus haben zwar zur gleichen Zeit auf derselben entlegenen Pazifikinsel Urlaub gemacht; aber sie lernen sich erst nach dem Rückflug auf dem heimatlichen Flughafen kennen – im Büro der Schadenersatzabteilung. Die Fluggesellschaft hat nämlich die antiken Vasen zerdeppert, von denen sich jeder der beiden vor Ort ein Exemplar gekauft hatte. Der Sachbearbeiter erkennt ihren Anspruch ohne Weiteres an, kann jedoch beim besten Willen den Wert der Kunstwerke nicht beurteilen. Von einer Befragung der Reisenden verspricht er sich, abgesehen von großen Übertreibungen, herzlich wenig.

Nach einigen Überlegungen entschließt er sich deshalb für ein trickreicheres Vorgehen. Er bittet beide, unabhängig voneinander den Wert der Vase in Euro auf ein Stück Papier zu schreiben, und zwar als ganze Zahl zwischen 2 und 100. Jegliche vorherige Absprache ist selbstverständlich verboten. Was er aber vorher bekannt gibt, ist das Auszahlungsverfahren: Geben beide denselben Wert an, so wird er diesen als den wahren Kaufpreis erachten und ihn an jeden von ihnen auszahlen. Unterscheiden sich die Angaben jedoch, so wird er die niedrigere Preisangabe für wahr und die höhere für einen Betrugsversuch halten. In diesem Fall bekommen beide den niedrigeren Betrag erstattet – allerdings mit einer Abweichung: Derjenige von beiden, der den niedrigeren Wert aufgeschrieben hat, bekommt 2 Euro mehr als Belohnung für Ehrlichkeit, dem anderen wird eine Strafgebühr von 2 Euro abgezogen. Wählt Tanja also zum Beispiel 46, Markus aber 100, so bekommt sie 48 Euro und er nur 44.

Für welche Zahlen werden sich Tanja und Markus wohl entscheiden? Für welche Zahl würden Sie sich entscheiden?



»Ich schreibe lieber etwas weniger als er, sonst unterbietet er mich. Aber das denkt er sich auch …«

Spieltheorie: die Wissenschaft von den ernsten Entscheidungen

Mit Szenarien dieser Art, in denen ein oder mehrere Beteiligte unabhängig voneinander Entscheidungen zu treffen haben und in Abhängigkeit von diesen Entscheidungen Vor- oder Nachteile erlangen, befasst sich die Spieltheorie; entsprechend werden solche Szenarien ganz profan als »Spiele« bezeichnet. Dieses spezielle Spiel namens »Urlauberdilemma« *(traveler's dilemma)* habe ich 1994 erfunden, und zwar mit mehreren Zielen im Sinn: Zum einen wollte ich die bornierte Auffassung von rationalem Handeln und kognitiven Prozessen anfech-

ten, die in Wirtschafts- und Politikwissenschaft verbreitet war; zum anderen ging es mir darum, die Annahmen der klassischen Ökonomie zum freien Spiel der Kräfte in Frage zu stellen, und drittens, einen logischen Widerspruch in dem Begriff der Rationalität (»Vernünftigkeit«) aufzuzeigen.

Dafür ist das Urlauberdilemma in der Tat ein geeignetes Mittel. Nach der Logik des Spiels ist nämlich für beide Spieler die eindeutig beste Wahl 2 Euro. Trotzdem entscheiden sich die meisten Menschen für 100 oder eine Zahl knapp darunter, entweder spontan und ohne das Spiel gänzlich durchdacht zu haben oder auch in bewusster Abweichung von der »rationalen« Wahl. In jedem Fall fährt derjenige den größeren Gewinn ein, der sich nicht an die so definierte Vernunft hält. Also muss es doch irgendwie rational sein, sich beim Urlauberdilemma gegen die Rationalität zu entscheiden.

Das Spiel hat in den Jahren nach seiner Entwicklung eine Eigendynamik entwickelt. Verschiedene Forscher haben es in verschiedenen Varianten experimentell durchgespielt, und die Ergebnisse erbrachten gewisse Einblicke in die menschliche Entscheidungsfindung. Gleichwohl bleibt ungeklärt, wie logisches, rationales Denken auf das Urlauberdilemma anzuwenden ist.

Aber warum ist 2 die logische Wahl? Folgen wir einem plausiblen Gedankengang von Tanja: Ihre erste Idee ist der größtmögliche Betrag von 100. Wäre Markus ebenso habgierig wie sie, würden sie tatsächlich beide 100 Euro kassieren (und sich hinterher ins Fäustchen lachen über die Dummheit des Schadenssachbearbeiters, denn natürlich gab es die Dinger auf dem Flohmarkt der Pazifikinsel für umgerechnet 5 Euro).

Daraufhin kommt ihr in den Sinn, dass sie mit der Angabe 99 noch ein bisschen mehr Geld herausholen könnte – dann wären es nämlich 101 Euro. Aber auf diese Idee würde sicherlich auch Markus kommen, womit sie wieder beide bei 99 Euro lägen. Also tut sie besser daran, 98 zu schreiben. So bleiben ihr wenigstens 100 Euro. Aber was, wenn Markus denselben Gedanken hat? Dann muss sie auf 97 heruntergehen, auf 96 und so weiter. Wenn die beiden das wirklich zu Ende denken, landen sie schließlich bei der kleinsten zulässigen Zahl 2. Die Vorstellung, dass es wirklich so weit kommt, mag zwar ausgesprochen albern wirken. Aber genau das spielt hier keine Rolle. Die reine, unanfechtbare Logik führt genau zu diesem Ergebnis.

Das Nash-Gleichgewicht und der gesunde Menschenverstand

Diese Art der Analyse, die so genannte Rückwärtsinduktion, wird in der Spieltheorie häufig angewandt. In unserem Fall behauptet sie, dass beide Spieler 2 Euro aufschreiben und je 2 Euro erhalten werden (und dass der Sachbearbeiter doch gar nicht so blöde ist). Praktisch alle Modelle der Spieltheorie kommen für das Urlauberdilemma zu diesem Ergebnis: Durch das Unvermögen, den eigenen Vorteil außer Acht zu lassen, verzichten die Spieler auf 98 Euro.

Das Urlauberdilemma ist mit dem bekannteren Gefangenendilemma verwandt. In diesem Szenario werden zwei Männer, die verdächtig sind, ein schweres Verbrechen begangen zu haben, getrennt voneinander verhört. Sie haben die Möglichkeit, zu schweigen oder den anderen zu belasten. Schweigen beide, so werden sie wegen der unklaren Beweislage nur für zwei Jahre inhaftiert, belasten sie sich gegenseitig, werden sie beide zu vier Jahren verurteilt. Wenn aber nur einer aussagt, kommt er auf Grund einer Kronzeugenregelung frei, während sein Partner volle fünf Jahre absitzen muss. Auf den ersten Blick scheint diese Geschichte nicht viel mit unseren Urlaubern und ihren kaputten Vasen zu tun zu haben. In der mathematischen Abstraktion ist sie jedoch dasselbe wie ein Urlauberdilemma, in dem jeder Spieler nur 2 oder 3 anstelle jeder Zahl zwischen 2 und 100 auswählen kann. ▷

»Ich schreibe lieber etwas weniger als sie, sonst unterbietet sie mich. Aber das denkt sie sich auch …«

▷ Spieltheoretiker reduzieren derlei Szenarien samt ihren blumigen Rahmengeschichten auf ein schlichtes quadratisches Zahlenschema, die so genannte Auszahlungsmatrix (Kasten rechts unten). In dieser Tabelle wählt Tanja gewissermaßen eine Zeile und Markus eine Spalte; das Feld im Schnittpunkt von Zeile und Spalte gibt die Auszahlung an beide Spieler für die gewählte Kombination an.

Ein Dilemma in des Wortes voller Bedeutung ist weder das Gefangenendilemma noch die auf zwei Auswahlmöglichkeiten reduzierte Version des Urlauberdilemmas. In beiden Spielen ist nämlich aus der Auszahlungsmatrix eine Wahl abzulesen, die »unter allen Umständen die beste« ist, in folgendem Sinn: Einerlei, was dein Mitspieler tut, dir geht es mit dieser Wahl besser als mit der anderen. Eine solche Strategie wird als »dominant« bezeichnet. In der reduzierten Form des Urlauberdilemmas ist »2 Euro« eine dominante Strategie (das entspricht im Gefangenendilemma der Strategie »aussagen«). Denn gleichgültig, ob Markus nun 2 oder 3 aufschreibt, Tanja erhält mit der Wahl von 2 Euro immer die bestmögliche Auszahlung: 4 Euro statt 3 Euro, wenn Markus 3 wählt, und 2 Euro statt eines feuchten Händedrucks, wenn sich Markus für 2 entscheidet.

Dagegen hat die Vollversion des Urlauberdilemmas keine dominante Strategie. Wählt Markus irgendeine Zahl zwischen 4 und 100, so empfiehlt sich für Tanja eine Wahl möglichst nahe unter dieser Zahl – und damit größer als 2.

Bei der Analyse eines Spiels pflegen Spieltheoretiker nach dem so genannten Nash-Gleichgewicht zu suchen. Sein Erfinder, der Mathematiker John Nash (Wirtschaftsnobelpreis 1994), ist der Held des Films »A beautiful mind« (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 25, und 4/2000, S. 106). Ein Nash-Gleichgewicht ist ein Feld der Auszahlungsmatrix, von dem aus kein Mitspieler seine Position durch einseitiges Abweichen verbessern kann.

Wenn also einer der Spieler beim Nachdenken über Strategien auf diesem Feld angekommen ist, sieht er keinen Anlass, davon wieder abzugehen: Er selbst kann seine Situation durch Revidieren seiner Entscheidung nicht verbessern, sein Mitspieler aber auch nicht, weswegen er bei seiner Entscheidung bleiben wird und weiteres Nachdenken sich für beide Seiten erübrigt. Ein Nash-Gleichgewicht ist also stabil in dem Sinne, dass der (Denk-)Prozess, einmal in dem Gleichgewicht gefangen, dort verharrt. Es bedeutet weder, dass ein Denkprozess notwendig auf ein Nash-Gleichgewicht zustrebt, noch dass dieses Gleichgewicht irgendwie vorteilhaft für die Beteiligten und deswegen stabil wäre.

Man nehme zum Beispiel die Kombination (100, 100) im Urlauberdilemma (die erste Zahl bezeichnet die Wahl von Tanja, die zweite die von Markus), die zu einer Auszahlung von 100 Euro für beide Reisende führt. Würde jetzt allein Tanja ihre Wahl auf 99 revidieren, würde sich ihre Auszahlung auf 101 Euro verbessern. Also ist (100, 100) kein Nash-Gleichgewicht.

Das einzige Nash-Gleichgewicht in diesem Spiel ist (2, 2): Sowohl Tanja als auch Markus schreiben 2 Euro auf. Praktisch alle formalen Analysen sagen dieses Ergebnis voraus. Das ist wenig verwunderlich, denn praktisch alle formalen Analysen beruhen auf dem Konzept des Nash-Gleichgewichts. Es gibt zwar noch viele weitere Gleichgewichtskonzepte, zum Beispiel das strenge, das perfekte und das starke Gleichgewicht sowie die rationalisierbare Lösung. Aber auch diese kommen sämtlich zu dem Ergebnis (2, 2) für das Urlauberdilemma.

Damit hat die Theorie ein ernsthaftes Problem. Denn in der Realität würde so gut wie jeder eine viel höhere Zahl als 2 wählen und damit durchschnittlich auch weitaus mehr als 2 Euro Gewinn einfahren. Unsere Intuition scheint also der gesamten Spieltheorie zu widersprechen.

Das Spiel und unsere intuitive Vorstellung von seinem Ausgang stellen außerdem auch die klassische Wirtschaftswissenschaft in Frage. Deren Grundannahme ist nämlich: Man soll den Menschen die größtmögliche Freiheit geben, ihren eigenen Vorteil zu verfolgen; denn genau dadurch wird die Effizienz des Wirtschaftssystems maximal. Der Markt steuert die Aktionen seiner Teilnehmer so, dass gesamtwirtschaftlich mit dem geringsten Aufwand der größte Nutzen erzielt wird (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 60).

Mit dem Aufkommen spieltheoretischer Methoden ist diese Grundüberzeugung bereits an mehreren Stellen

BOB MATTHEWS, OFFICE OF COMMUNICATIONS, PRINCETON UNIVERSITY

Das Konzept des Nash-Gleichgewichts durchzieht die gesamte Spieltheorie; aber es kann das Verhalten der Menschen im Urlauberdilemma nicht erklären

In Kürze

▶ Im Spiel **»Urlauberdilemma«** wählen zwei Personen unabhängig voneinander einen Betrag zwischen 2 und 100; die kleinere der beiden Zahlen wird an beide ausgeschüttet, mit einem Bonus für den, der die kleinere Zahl genannt hat, und einem Abschlag für den anderen. Nach der **Spieltheorie** müsste die Vernunft (»Rationalität«) beide Spieler zur kleinstmöglichen Wahl 2 bewegen; die meisten Menschen wählen jedoch eine Zahl, die weit näher an 100 liegt, und fahren besser damit.

▶ Man kann sich also rational dafür entscheiden, der **Rationalität** zuwider zu handeln. Um das in voller logischer Strenge zu verstehen, ist eine neue Argumentationsstruktur erforderlich.

▶ Die Ergebnisse des Spiels widersprechen der Annahme von Wirtschaftswissenschaftlern, die Spieltheorie könne das Verhalten egoistischer, rational denkender Spieler voraussagen. Sie belegen darüber hinaus, dass **reiner Egoismus** nicht immer die beste wirtschaftliche Strategie darstellt – nicht einmal für reine Egoisten.

erschüttert worden; aber selbst diese Methoden beruhten lange Zeit auf dem allgemeinen Grundsatz, der Mensch treffe eigennützige, rationale Entscheidungen (die sich dann mit Hilfe der genannten Methoden vorhersagen lassen). Das Urlauberdilemma bringt nun gleich beide Grundideen ins Wanken: die wirtschaftsliberale Vorstellung, ungehemmter Eigennutz sei gut für die Wirtschaft, ebenso wie die spieltheoretische Annahme, der Mensch sei von ungehemmtem Eigennutz getrieben.

Der effizienteste Spielausgang beim Urlauberdilemma ist (100, 100), denn damit wird die Summe der Auszahlungen maximal. Selbstsüchtige Spieler werden um des eigenen Vorteils willen zu kleineren Werten übergehen und damit die Gesamtauszahlung mindern. Also führt eigennütziges Verhalten in diesem Fall eben nicht zum gesamtwirtschaftlichen Optimum. Die Tatsache, dass das Nash-Gleichgewicht (2, 2) in der Realität nicht vorkommt, zeigt wiederum, dass der Mensch nicht rational entscheidet – oder vielmehr, dass die übliche Vorstellung von rationalem Verhalten revisionsbedürftig ist.

Dass die Menschen sich in ökonomischen Entscheidungen von anderen Motiven als dem Eigennutz leiten lassen, ist nicht neu und durch Spiele wie das Ultimatum-Spiel eindrucksvoll belegt worden (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52). Aber das Urlauberdilemma ist eine noch härtere Anfechtung, denn es zeigt, dass selbst ein Spieler, der nichts anderes verfolgt als seinen Eigennutz, den Empfehlungen der klassischen Spieltheorie besser nicht folgen sollte.

Das Urlauberdilemma ist übrigens keineswegs so exotisch, wie es den Anschein haben mag. Ein Akteur nimmt große Nachteile für sich in Kauf, um einen Vorteil gegenüber seinem Gegner zu erlangen; der Vorteil verkehrt sich jedoch ins Gegenteil, weil der Gegner seinerseits große Nachteile für sich in Kauf nimmt … Diesem Muster folgen sowohl das ▷

Die Auszahlungsmatrix des Urlauberdilemmas

Alles, was ein Theoretiker über ein Spiel wie das Urlauberdilemma wissen muss, steht in der Auszahlungsmatrix des Spiels (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 25). Tanjas Wahlmöglichkeiten sind in der Spalte am linken Rand aufgeführt, diejenigen von Markus in der obersten Zeile. Tanja wählt durch ihre Entscheidung eine Zeile, Markus eine Spalte; durch beide zusammen wird genau ein Feld der Matrix bestimmt. Die erste Zahl in diesem Feld gibt Tanjas Auszahlung an, die zweite den entsprechenden Wert für Markus. Wählt Tanja zum Beispiel 98 und Markus 99, so bekommt Tanja 100 Euro ausgezahlt, Markus 96.

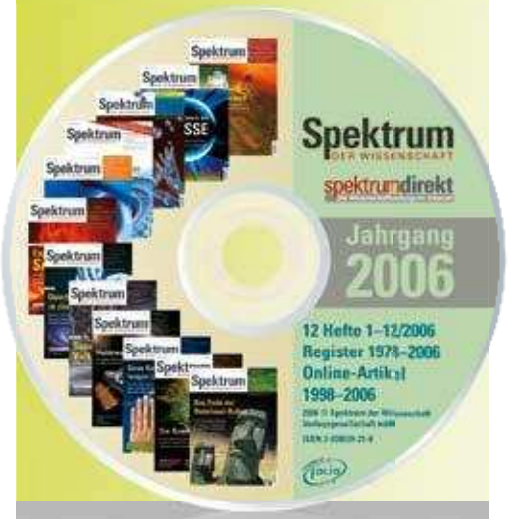
Die Kombination, bei der beide Spieler 2 wählen und damit auch 2 Euro ausgezahlt bekommen (dunkel unterlegtes Feld links oben in der Auszahlungsmatrix), ist ein Nash-Gleichgewicht. Es ist dadurch charakterisiert, dass jeder der beiden Spieler seine Situation durch einseitiges Abweichen nur verschlechtern kann. Reduziert man die Entscheidungsmöglichkeiten im Spiel auf 2 und 3 (schwarze Umrahmung), so ist das Urlauberdilemma äquivalent zum Gefangenendilemma.

Markus' Wahl (in Euro)

Tanjas Wahl (in Euro)	2	3	4	…	98	99	100
2	2 2	4 0	4 0	…	4 0	4 0	4 0
3	0 4	3 3	5 1	…	5 1	5 1	5 1
4	0 4	1 5	4 4	…	6 2	6 2	6 2
…	…	…	…		…	…	…
98	0 4	1 5	2 6	…	98 98	100 96	100 96
99	0 4	1 5	2 6	…	96 100	99 99	101 97
100	0 4	1 5	2 6	…	96 100	97 101	100 100

MATT COLLINS

Ein starker Jahrgang …



… ist die CD-ROM 2006 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

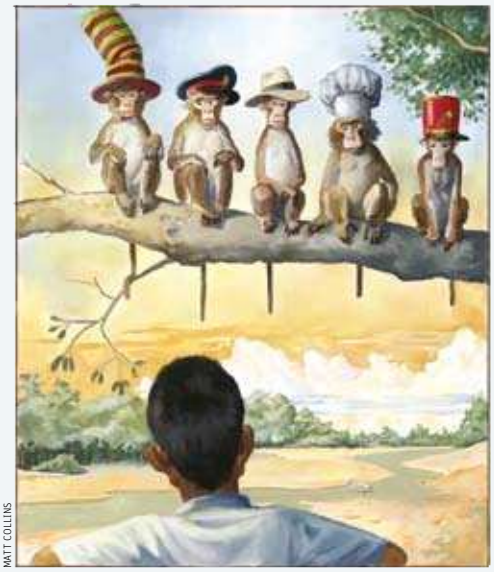
Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Wissen aus erster Hand

Ich weiss, dass du weisst, dass ich weiss …



MATT COLLINS

Ein Huthändler, der nach einem Nickerchen im Freien erwacht, stellt mit Entsetzen fest, dass eine Horde Affen seinen kompletten Hutvorrat in die Krone eines hohen Baumes verschleppt hat. Voll Zorn reißt er sich seinen eigenen Hut vom Kopf und schleudert ihn auf den Boden. Die Affen, bekannt für ihren ausgeprägten Nachahmungsdrang, folgen prompt seinem Beispiel und schmeißen ihre Hüte erdwärts, wo sie der Hutverkäufer eilig wieder einsammelt.

Ein halbes Jahrhundert später stellt sein Enkel, ebenfalls Huthändler, seine Waren unter demselben Baum ab und hält ein Nickerchen. Auch er muss nach dem Erwachen bestürzt feststellen, dass seine Hüte von einer Horde Affen verschleppt worden sind. Da erinnert er sich an die Geschichte seines Großvaters und schleudert voller Hoffnung seinen Hut zu Boden – aber nichts passiert. Nur einer der Affen klettert vom Baum, haut dem Mann dessen Hut um die Ohren und sagt: »Glaubst du vielleicht, du bist hier der Einzige mit einem Großvater?«

Diese Geschichte, die ich aus Indien kenne, veranschaulicht einen wichtigen Unterschied zwischen dem gesunden Menschenverstand und der Spieltheorie: In der Letzteren kann die Frage, was für einen Spieler rational ist, davon abhängen, was sein Mitspieler für rational hält. Damit Markus im Urlauberdilemma seine Wahl treffen kann, muss er sich in Tanjas Lage versetzen und versuchen, ihre Gedankengänge nachzuvollziehen. Versucht nun aber

▷ Wettrüsten zwischen verfeindeten Nationen als auch ein ruinöser Preiskampf unter Konkurrenten (wobei im letzten Fall wenigstens einer einen Vorteil davon hat, nämlich der Kunde).

Alles Nachdenken über dieses Spiel läuft auf zwei entscheidende Fragen hinaus: Welche Wahl treffen echte Menschen bei diesem Spiel? Und warum kann die Spieltheorie dieses Verhalten nicht erklären? Auf die erste Frage haben wir inzwischen viele Antworten, auf die zweite sehr wenige.

Wie sich der Mensch dabei verhält

In den letzten zehn Jahren wurden viele aufschlussreiche Experimente zum Urlauberdilemma durchgeführt. Das wohl berühmteste unter ihnen ist der Laborversuch von C. Monica Capra, Jakob K. Goeree, Rosario Gomez und Charles A. Holt an der Universität von Virginia in Charlottesville. Die Versuchspersonen, Studierende der Wirtschaftswissenschaften, erhielten 6 Dollar für die Teilnahme sowie die Auszahlungen, die sie in verschiedenen Urlauberdilemma-Spielen erwirtschafteten, allerdings in Cent statt in Dollar, um die Kosten in Grenzen zu halten. Statt zwischen 2 und 100 konnte man Beträge zwischen 80 und 200 wählen; den »Ehrlichkeitsbonus», das heißt die Belohnung für den, der den kleineren Betrag nennt, und zugleich die Strafgebühr für den anderen, variierten die Forscher von Spiel zu Spiel zwischen 5 und 80 Cent. Für die theoretische Analyse macht die Höhe des Bonus keinen Unterschied; die Rückwärtsinduktion führt stets zu dem Ergebnis (80, 80), das in jedem Fall das einzige Nash-Gleichgewicht darstellt. Die Forscher wollten wissen, ob die Höhe des Bonus gleichwohl das Verhalten der Probanden beeinflusst.

Das Experiment bestätigte die intuitive Erwartung, nach der die Spieler in der Regel weitaus höhere Beträge als 80 wählen: Bei einem Bonus von 5 Cent lag die durchschnittliche Wahl bei 180; sie fiel auf 120, wenn der Bonus auf 80 Cent erhöht wurde.

Capra und ihre Kollegen untersuchten außerdem, ob sich das Verhalten der Probanden änderte, wenn man sie wiederholt spielen ließ. Würden sie im Verlaufe des Spiels dazu übergehen, das Nash-Gleichgewicht zu wählen, selbst wenn es ihrem Gefühl widersprach? Tatsächlich konvergierten die Entscheidungen bei großen Boni gegen 80, bei kleinen jedoch verblüffenderweise gegen das andere Extrem 200.

Dass die meisten Menschen beim Urlauberdilemma vom Nash-Gleichgewicht abweichen, wurde auch durch ein Internet-Experiment bestätigt. Ariel Rubinstein, der an den Universitäten Tel Aviv und New York lehrt, bat zwischen 2002 und 2004 im Vorfeld seiner Vorträge zum Thema »Spieltheorie und John Nash« seine Zuhörer, im Urlauberdilemma eine Zahl zwischen 180 und 300 zu wählen, die sie sich als Dollarbetrag vorstellen sollten. Der Bonus war mit 5 Dollar angesetzt. Etwa 2500 Teilnehmer aus sieben verschiedenen Ländern antworteten und lieferten damit eine Datenfülle, die man in einem Laborversuch niemals hätte erreichen können.

Während sich weniger als ein Siebtel der Spieler für das Nash-Gleichgewicht 180 entschied, wählte eine Mehrheit (55 Prozent) das Maximum 300 (Kasten rechts unten). Überraschenderweise verändert sich dieses Bild kaum, wenn man gewisse Untergruppen der Spieler, etwa Angehörige verschiedener Staaten, herausgreift.

Auch mit diesem umfangreichen Datenmaterial bleiben Fragen dazu offen, was sich die Leute bei ihren Entscheidungen gedacht haben. Insbesondere leidet ausgerechnet die populärste Strategie 300 als Einzige unter einem Nachteil: Sie ist »dominiert«, das heißt, es gibt eine andere Strategie, nämlich 299, die niemals eine schlechtere und manchmal eine bessere Auszahlung bringt, womit sie eindeutig zu bevorzugen wäre.

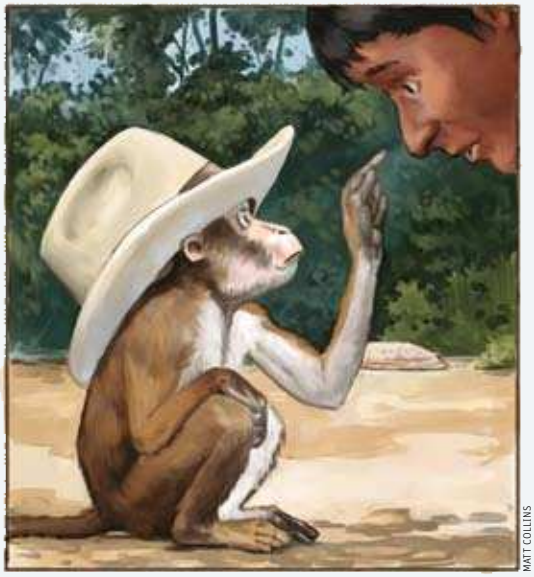
Rubinstein vermutete je nach der Höhe des genannten Betrags unterschiedliche kognitive Prozesse hinter den Entscheidungen der Teilnehmer: 300 sei eine spontane, gefühlsmäßige Entscheidung »aus dem Bauch heraus«. Eine Wahl zwischen 295 und 299 zeuge bereits von strategischem Denken (zum

gleichzeitig Tanja, so wie Markus zu denken, drehen sich die beiden im Kreis. Mit anderen Worten: Tanja und Markus sind vernünftig, sie wissen auch beide vom anderen, dass er vernünftig ist, sie wissen auch, dass der andere weiß, dass sie vernünftig sind, und so weiter. »Rationalität ist gemeinsames Wissen der Beteiligten«, so formulieren die Spieltheoretiker diese Grundannahme.

Aber so explizit drücken sie das selten aus. Die Grundannahme gehört so sehr zum eisernen Bestand der Theorie, dass sie in der Regel stillschweigend vorausgesetzt wird.

Ich glaube, dass genau diese Annahme für den Konflikt zwischen Logik und Intuition verantwortlich ist. Im Falle des Urlauberdilemmas behält die Intuition Recht und wartet nur darauf, durch eine durchdachtere Logik darin bestätigt zu werden.

Ein sehr ähnliches Problem plagte die frühe Mengenlehre. Die Mathematiker setzten stillschweigend und wie selbstverständlich die Existenz einer universellen Menge voraus – einer Menge, die alles enthält. Obwohl diese Vorstellung unproblematisch und geradezu naturgegeben schien, führte sie bei genauerer Betrachtung auf Widersprüche, mit dem Ergebnis, dass die universelle Menge, ebenso wie die »Menge aller Mengen« schließlich aus der Mengenlehre verbannt werden musste. Nach meiner Überzeugung steht der Hypothese von der Rationalität als dem gemeinsamen Wissen aller Beteiligten ein ähnliches Schicksal bevor.


MATT COLLINS

Beispiel einige Schritte der Rückwärtsinduktion), wohingegen eine Zahl zwischen 181 und 294 im Wesentlichen dem Zufall zuzuschreiben sei. Die Wahl der Zahl 180 lasse schließlich auf – angelesene oder selbst erarbeitete – spieltheoretische Überlegungen schließen.

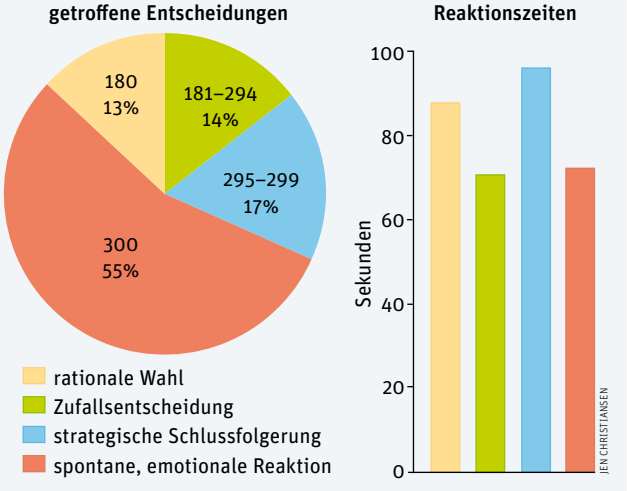
Ein Indiz für die Richtigkeit von Rubinsteins Vermutungen könnte die Zeit liefern, welche die Spieler für ihre Entscheidung benötigten – zumindest was die drei ersten Gruppen angeht. In der Tat hatten diejenigen, die Zahlen zwischen 295 und 299 wählten, am längsten darüber nachgedacht, nämlich durchschnittlich 96 Sekunden, während sowohl die Entscheidung für die 300 als auch für jede Zahl zwischen 181 und 294 im Mittel nur 70 Sekunden in Anspruch nahm.

Unter den vielen Versuchen, die Abweichung zwischen Theorie und Praxis bei den Experimenten zum Urlauberdilemma zu erklären, ist auch die nahe liegende These von der Trägheit des Geistes. Viele Spieler seien schlichtweg nicht fähig oder willens, die gedanklichen Schritte hin zum Nash-Gleichgewicht zu vollziehen, weswegen ihre Entscheidung unweigerlich irrational ausfalle.

Das trifft zweifellos in vielen Fällen zu, nicht aber auf die Untersuchungen von Tilman Becker, Michael Carter und Jörg Naeve. Die drei Forscher von der Universität Hohenheim in Stuttgart ließen 2002 in ihrem Experiment 51 Mitglieder der Game Theory Society, eines Berufsverbands der Spieltheoretiker, die Originalversion des Urlauberdilemmas mit Werten von 2 bis 100 spielen. Und zwar teilte jeder Teilnehmer den Experimentatoren mit, wie er spielen würde. Diese Strategie konnte entweder eine einzige Zahl sein (eine »reine« Strategie) oder mehrere Zahlen, unter denen der Spieler im Einzelfall eine auswürfeln würde, mitsamt den zugehörigen Wahrscheinlichkeiten. (Solche »gemischten« ▷

Was haben sich die Spieler dabei gedacht?

Wissenschaftler stellten die Hypothese auf, dass die Spieler beim Urlauberdilemma mehreren Denkmustern folgen, die an ihrer Entscheidung zu erkennen sind. Die Wahlmöglichkeiten lagen beim betrachteten Szenario zwischen 180 und 300, und die Denkmuster wurden wie folgt eingeteilt (Kreisdiagramm): spontane, gefühlsmäßige Reaktion (die zur Wahl 300 führt), strategische Überlegungen (295 – 299) und Zufallsentscheidung (181 – 294). Spieler, welche die einzig rationale Wahl 180 trafen, könnten sich diese selbst hergeleitet oder schon vorab gekannt haben. Wie erwartet haben diejenigen, die eine spontane oder zufällige Wahl trafen, durchschnittlich weniger Zeit für ihre Entscheidung gebraucht (Balkendiagramm).



▷ Strategien sind dann interessant, wenn es darauf ankommt, für den Gegenspieler unberechenbar zu bleiben. Beim Urlauberdilemma spielen sie, wie sich herausstellt, keine nennenswerte Rolle.) Es gab einen finanziellen Anreiz, sich seine Strategie gut zu überlegen: Aus allen Teilnehmern wurde ein Gewinner ausgelost; diesem wurde als Preis ein Betrag von 20 Dollar mal dem Durchschnitt der Ergebnisse, die er im Spiel gegen alle anderen Teilnehmer erzielt hätte, versprochen. Am Ende hatte der Gewinner einen Durchschnitt von 85 und ging dementsprechend um 1700 Dollar reicher nach Hause.

Von den 51 Spielern entschieden sich 45 für eine reine Strategie und von diesen drei für das Nash-Gleichgewicht 2, zehn für die dominierte Strategie 100 und dreiundzwanzig für eine Zahl zwischen 95 und 99. Man kann davon ausgehen, dass diese Spieler, sämtlich Spieltheoretiker von Beruf, mit dem Denken bis hin zum Nash-Gleichgewicht keine ernsthaften Schwierigkeiten hatten; gleichwohl missachteten sie mit großer Mehrheit das, was ihre eigene Theorie für rational erklärte.

Ein ungelöstes Problem

Vordergründig gibt es dafür eine einfache Erklärung: Die meisten Spieler vermuteten, dass ihre Kollegen Strategien irgendwo in den hohen Neunzigern wählen würden, stellten sich darauf ein, indem sie es ihnen gleichtaten – und hatten Erfolg, weil ihre Vermutung zutraf. Aber wie kommt es zu dieser sich selbst erfüllenden Vermutung? Warum erwartete jeder von jedem anderen so hohe Zahlen?

Vielleicht ist neben dem Egoismus auch der Altruismus fest in unserer Psyche verwurzelt, und unser Verhalten resultiert aus einem ständigen Widerstreit dieser beiden Charakterzüge. Als Reisender im Urlauberdilemma weiß ich, dass der Vertreter der Fluggesellschaft genau dann am tiefsten in die Tasche greifen muss, wenn wir beide 100 wählen. Wahrscheinlich wäre es mir zuwider, meinen Reisegefährten für nur einen zusätzlichen Euro um drei Euro zu bringen, sodass ich bewusst von der Wahl 99 ablasse, die für mich selbst vorteilhafter wäre.

Manche Wirtschaftswissenschaftler haben komplizierte und nicht besonders realitätsnahe Modelle des menschlichen Denkens so konstruiert, dass sie diese und andere experimentelle Ergebnisse reproduzierten. Ich halte nicht viel von derartigen Bemühungen. Je ausgetüftelter diese Modelle werden, desto weniger tragen sie zur Erkenntnis bei.

Die schwierigste Aufgabe besteht nach meiner Auffassung auch nicht darin, das Verhalten des Durchschnittsmenschen in der Situation des Urlauberdilemmas zu erklären. Die drei Ursachen »angeborener Altruismus«, »anerzogene Kooperationsbereitschaft« und »mangelndes Denkvermögen« sind dafür vollauf ausreichend; die Experimente haben immerhin zu klären geholfen, in welcher Mischung diese Gründe wirksam sind. Vielmehr bin ich der Überzeugung, dass das Nash-Gleichgewicht selbst dann nicht häufiger gewählt würde, wenn man alle diese Gründe unwirksam machen könnte. Ein scharfer Denker, dem jedes Gefühl mit Ausnahme seines eigenen Gewinnstrebens fremd ist, würde immer noch beständig hohe Zahlen spielen. Warum? Anders als bei zahlreichen Problemen in der modernen Spieltheorie, die zwar schwierige Mathematik enthalten, zu ihrer Lösung aber nur die Anwendung dieser mathematischen Techniken erfordern, sind hier kreativere Ansätze gefragt.

Stellen Sie sich vor, Sie und ich wären zwei dieser cleveren, erbarmungslosen Spieler. Was geht uns durch den Kopf? Ich nehme an, dass Sie eine hohe Zahl wählen, sagen wir zwischen 90 und 99. Sie vermuten vorerst das Gleiche von mir. Dann sollte ich besser nicht 99 spielen, denn die 98 bringt mir in keinem Fall ein schlechteres, vielleicht aber ein besseres Ergebnis. Da ich aber davon ausgehe, dass Sie genauso denken, streiche ich die 98, und Sie aus demselben Grund auch. Auf diese Weise wären wir mit denselben Überlegungen, die unseren beiden Urlaubern schon in den Sinn kamen, schnell bei der Zahl 90 angelangt. Dies war aber ursprünglich nur die untere Grenze unserer Überlegungen – wir wollten doch beide eine hohe Zahl spielen … Offensichtlich ist es also unmöglich, so etwas wie »die Menge der hohen Zahlen, die clevere, erbarmungslose Spieler wählen würden« zu definieren. Und der Versuch, rationales Denken auf schlecht definierte Gegenstände anzuwenden, führt praktisch wie philosophisch in sumpfiges Gelände.

Würde ich selbst mit diesem Spiel konfrontiert, so würde ich mir sagen: »Zum Kuckuck mit der Spieltheorie. Ich spiele einfach eine hohe Zahl, sagen wir 95, ich weiß, dass mein Gegner die Dinge ähnlich sieht, und vor allem, dass er von der Theorie ›Die nächstniedrigere Zahl ist immer die bessere‹ genauso wenig hält wie ich.« Das Interessante ist, dass in dieser kategorischen Ablehnung der Rationalität und formalen Logik eine übergeordnete Rationalität steckt. Wenn beide Spieler dieser Meta-Rationalität folgen, werden auch beide Erfolg damit haben.

Die Idee eines Verhaltens, das aus rationaler Ablehnung rationalen Verhaltens entsteht, ist nicht einfach zu formalisieren. Es geht um nichts weniger als die Auflösung der logischen Widersprüche der Spieltheorie, die das Urlauberdilemma auf den Punkt bringt. ◁

Kaushik Basu ist Professor für Wirtschaftswissenschaften an der Cornell-Universität in Ithaca (New York). Er hat zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten zu den Themen wirtschaftliche Entwicklung, Sozialwirtschaft, Spieltheorie und Industrieorganisation veröffentlicht. Darüber hinaus schreibt er für die Publikumsmedien und ist mit einer monatlichen Rubrik bei BBC News online vertreten.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Instinctive and cognitive reasoning: response time studies. Von Ariel Rubinstein, 2007. Online unter http://arielrubinstein.tau.ac.il/papers/Response.pdf

Experts playing the traveler's dilemma. Von Tilman Becker, Michael Carter und Jörg Naeve. Institut für Volkswirtschaftslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart. Diskussionsbeitrag 252, 2005. Online unter http://www.uni-hohenheim.de/RePEc/hoh/papers/252.pdf

The logic of backwards inductions. Von G. Priest in: Economics and Philosophy, Bd. 16, Nr. 2, S. 267, 2000

Anomalous behavior in a traveler's dilemma? Von C. Monica Capra et al. in: American Economic Review, Bd. 89, Nr. 3, S. 678, Juni 1999

The traveler's dilemma: paradoxes of rationality in game theory. Von Kaushik Basu in: American Economic Review, Bd. 84, Nr. 2, S. 391, Mai 1994

On the nonexistence of a rationality definition for extensive games. Von Kaushik Basu in: International Journal of Game Theory, Bd. 19, S. 33, 1990

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893108.

Geniale Ideen zu Gift und Gülle

Dieser zweite Teil des Berichts über den diesjährigen Bundeswettbewerb »Jugend forscht« konzentriert sich auf Projekte rund um das Thema Lebenswissenschaften (1. Teil im Juli-Heft).

Von Stefanie Reinberger

Leuchtend grün schimmert die Flüssigkeit im Glaskolben und lässt unvermeidlich Assoziationen an eine Hexenküche aufkommen. Tatsächlich haben Philomena Apitzsch (18) und Tobias Hahn (19) aus Halle (Saale) Gift im Sinn. Aber sie wollen es nicht zubereiten, sondern in Wasserproben nachweisen.

BIOSENSOREN

Die einzellige Grünalge *Chlorella* produziert mittels Photosynthese Sauerstoff, und zwar umso mehr, je reiner das Wasser ist, in dem sie lebt. Apitzsch und Hahn beschichteten eine Elektrode mit einem in Gelatine eingebetteten Algenkonzentrat und bestrahlten das Ganze mit zwanzig Leuchtdioden. Dadurch setzte die Photosynthese und damit die Sauerstoffproduktion ein, was sich an der Elektrode durch ein elektrisches Signal bemerkbar machte.

Bereits geringe Mengen des Zellgifts Kupfersulfat reichen aus, um die Sauerstoffproduktion messbar zu hemmen, ähnlich das Abwasser einer Waschmaschine. Allerdings ist der hochempfindliche Giftindikator nicht irreversibel gestört, sondern regeneriert sich sehr schnell wieder. Bereits nach wenigen Stunden in sauberem Wasser stehen die Einzeller für die nächste Messung bereit.

Die beiden Jungforscher wurden für diese pfiffige Lösung mit dem dritten Preis des Fachbereichs Chemie ausgezeichnet. Mehr noch: Sie stehen bereits in intensivem Austausch mit Krankenhäusern, einer Firma für Algenproduktion sowie dem örtlichen Wasserversorger ▷

»Huch, das piept ja, wenn ich die Finger bewege!« Die Apparatur von Nina Maria Reich und Mathilda Keller setzt die Aktivität bestimmter Muskeln in Töne um.

MUSKELAKTIVITÄTSMESSUNG

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: STEFANIE REINBERGER

▷ in Halle, um Einsatzmöglichkeiten für ihren lebenden Giftsensor zu testen.

Als »Spürhund« für unerwünschte Stoffe ist neben Algen auch mancherlei Getier geeignet. Ajescha Prozell (15) entwickelte einen Test, um Insektizidbelastung in Räumen nachzuweisen. Dazu setzte sie verschiedene Insekten ein: den Kornkäfer und zwei verschiedene Schlupfwespenarten, *Lariophagus* und *Trichogramma*, die unterschiedlich empfindlich auf Insektenvernichtungsmittel reagieren. Das testete die Berlinerin zunächst, indem sie jeweils zehn Tiere in Petrischalen setzte und mit Insektengift in Kontakt brachte. Die Schlupfwespe *Trichogramma* starb bereits bei sehr geringen Mengen, bei etwas höheren Giftkonzentrationen dann *Lariophagus*. Den Kornkäfer hingegen konnten erst sehr hohe Dosen umbringen.

So erhielt die Schülerin eine Eichkurve, mit deren Hilfe sie im nächsten Schritt untersuchte, wie stark die Schulen in Berlin-Pankow mit Insektiziden belastet sind. Dazu sammelte sie Staubproben in den Klassenräumen und gab diese zu den kleinen Krabbeltieren in die Schalen. »Zum Glück sind bei keiner der Proben Kornkäfer gestorben«, berichtet Ajescha Prozell. »Denn das hätte eine sehr hohe Belastung der Schulen bedeutet, die auch für Menschen gefährlich wäre.«

Gerade für die Überprüfung von öffentlichen Räumen wie Schulen oder Kindergärten ist Ajeschas beeindruckend einfacher Test eine interessante und kostengünstige Alternative zu den herkömmlichen, äußerst aufwändigen und teuren Testverfahren, die auf chemischen Untersuchungen basieren. Die Schülerin, die bereits im Vorjahr mit einem Projekt zu Schlupfwespen bei »Jugend forscht« angetreten ist, wurde für ihre Arbeit mit dem ersten Preis im Fachbereich Biologie ausgezeichnet.

SCHÄDLINGSBEKÄMPFUNG

Auch der fünfte Preis in diesem Ressort ging an ein Projekt zum Umweltschutz. Die 19-jährige Vivien Miriam Rohwedder aus Preetz (Schleswig-Holstein) arbeitete an biologischer Schädlingsbekämpfung mit dem Fadenwurm *Steinernema feltiae*. Diese Nematodenart wird etwa in der Champignonzucht, aber auch auf Fußball- oder Golfplätzen insbesondere zur Bekämpfung von Trauermückenlarven eingesetzt. Der Wurm enthält in seinem Inneren ein Bakterium, das er abgibt, sobald er in die Larve eingedrungen ist, und das diese zersetzt. Aber wie findet der Wurm die Larve?

Um diesem Rätsel auf den Grund zu gehen, ließ Vivien Rohwedder die Würmer in ein sich verzweigendes Rohr kriechen; an das Ende des einen Zweigs legte sie ihnen lebende Mehlwürmer und Wachsmottenlarven als Köder hin, an das andere Ende tote. So stellte sie fest, dass sich *Steinernema feltiae* von lebenden Wirtstieren deutlich stärker angezogen fühlt. In einem weiteren Versuchsansatz verfolgte sie die Spuren der Würmer auf Agaroseplatten und entdeckte, dass allein die Hämolymphe – die Körperflüssigkeit von Gliederfüßern und Weichtieren – ausreicht, um den Bewegungsdrang der Nematoden zu verstärken. »Das lässt sich ausnutzen, indem man gemeinsam mit dem Fadenwurm auch Hämolymphe auf ein Feld bringt und so die Würmer aktiviert«, erklärt Rohwedder die Bedeutung ihrer Arbeit.

GÜLLE ZU GELD

Dass sich Umweltschutz in bare Münze verwandeln lässt, zeigten die Geschwister Dragana (17) und Milan (18) Gerovac aus Neu-Isenburg (Hessen) und sahnten dafür einen Sonderpreis für die beste interdisziplinäre Arbeit ab. Sie entwickelten ein Verfahren, um mit Hilfe von Pilzkulturen und Stroh aus Gülle den hochwertigen Dünger Struvit herzustellen – mit Hilfe eines Reaktors, dem die beiden Jungtüftler den originellen Namen »stm-engine« für »shit to money« verpassten.

Zwar können Bauern auch direkt mit Gülle, einem Gemisch aus Tierkot und Urin, düngen, doch das stinkt nicht nur zum Himmel, sondern belastet den Boden auch stark mit Nitraten. Struvit hingegen lässt sich besser lagern und dosieren als das Ausgangsprodukt. So können Landwirte nicht nur überflüssige Gülle entsorgen, sondern gleichzeitig die Umwelt schonen und durch den Verkauf des Düngemittels sogar noch Geld verdienen.

MUSKELAKTIVITÄTSMESSUNG

Die 19-jährigen Schülerinnen Nina Maria Reich und Mathilda Keller aus Hermannsburg (Niedersachsen) entwickelten eine Messapparatur, mit der sich mittels Oberflächenelektroden die Aktivität ausgewählter Muskeln registrieren lässt – und zwar nicht nur sicht-, sondern auch hörbar. Das Ganze ist weit mehr als eine Spielerei. Reich ist überzeugt: »Die gemessene Aktivität in ein akustisches Signal umzuwandeln könnte zum Beispiel für die Physiotherapie eine große Hilfe sein, quasi als Rückversicherung, ob bei einer bestimmten Übung die richtige Muskelgruppe eingesetzt wurde.« Für diese Arbeit erhielten die Schülerinnen einen Sonderpreis sowie eine Einladung zur Tagung der Nobelpreisträger.

ANTIKÖRPERTHERAPIE

Ein weiterer Sonderpreis ging an Katharina Fehre. Die 19-Jährige, die mittlerweile ihr Medizinstudium in Leipzig aufgenommen hat, überprüfte eine Antikörpertherapie gegen Krebs, die im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg entwickelt wurde – ursprünglich zur Behandlung von Knochenmetastasen. Da Antikörper die Blut-Hirn-Schranke passieren können, sollte es möglich sein, diese Methode auch zur Zerstörung von Absiedelungen im Gehirn einzusetzen. Dass dies tatsächlich funktioniert, konnte Katharina Fehre belegen, indem sie tumorbefallene Gehirnschnitte von Mäusen untersuchte, die mit der Antikörpertherapie aus Heidelberg behandelt worden waren.

BAKTERIOPHAGEN

Christian Gerloff (19), Tobias Minth (19) und Martin Gerhardt (18) aus Wernigerode (Sachsen-Anhalt) widmeten sich der Frage, ob sich Typhus mit Bakteriophagen bekämpfen lässt; das sind Viren, die Bakterien befallen und im Lauf ihres Vermehrungszyklus zerstören. Für höhere Organismen sind sie völlig ungefährlich: Menschen scheiden sie schadlos über den Darm wieder aus. Forscher tüfteln weltweit an Möglichkeiten, diese speziellen Viren zur Bekämpfung von Krankheiten einzusetzen, bei denen Antibiotika längst ihre Macht eingebüßt haben. Das ist auch bei Typhus der Fall, wo das Auftreten mehrfach resistenter Erreger in Ländern wie Indien zu einem großen Problem wird.

Für die drei Jungforscher stand am Anfang ihres Projekts vor allem eine Menge Fleißarbeit. Fast zwei Jahre lang fischten sie nach einem geeigneten Phagen – durch Filtern von Wasserproben aus der heimischen Kläranlage. Denn um sich für die Therapie zu eignen, muss das Virus nicht nur in der Lage sein, den Typhuserreger *Salmonella typhi* zu befal-

WEINHERSTELLUNG

SPRACHENTWICKLUNG

Dominik (links) und Domina: Die klassische Maischevergärung mit Reinzuchthefen verleiht dem Wein aus der Domina-Rebsorte den rassigen Rotton. Niloufar Rahi (rechts) vollzog die Entwicklung der kindlichen Sprachkompetenz mit Hilfe einer eigens erfundenen Kunstsprache nach.

len und zu zerstören. »Wichtig war auch, dass unser Phage kein Zuckermolekül als Rezeptor benutzt, um in das Bakterium zu gelangen«, erklärt Martin Gerhardt und fährt fort: »Dann wäre die Gefahr zu groß, dass sich der Erreger durch Mutationen verändert und sich wieder Resistenzen entwickeln.« Nach langer Suche war ein geeigneter Kandidat gefunden – und erwies sich als Volltreffer: Ein Abgleich mit internationalen Datenbanken ergab, dass das Protein, das der Phage der Wernigeroder als Andockstelle benutzt, bei allen bekannten Stämmen von *Salmonella typhi* vorkommt.

Die drei Schüler sind zwar bei der Preisverleihung in Hamburg leer ausgegangen; dennoch wird der Erfolg ihrer Arbeit bereits gewürdigt. Ärzte in Indien haben Interesse bekundet, den Phagen tatsächlich für die Behandlung einzusetzen. Die Hoffnung ist, damit auch so genannte Dauerausscheider zu behandeln, Menschen, die zwar selbst keine Krankheitssymptome mehr zeigen, das Bakterium aber dennoch in ihrer Gallenblase tragen und für ihre Mitmenschen ansteckend sind.

WEINHERSTELLUNG

Biologie – das ist nicht nur vergiftete Umwelt und tödliche Krankheit, sondern manchmal auch kultivierter Genuss. Dominik Herzog (18) aus Kirchheimbolanden (Rheinland-Pfalz) untersuchte verschiedene Gärmethoden bei der Weinherstellung, um herauszufinden, mit welchem Verfahren sich besonders dunkelrote Weine herstellen lassen. Diese liegen nämlich im Trend, wie der Schüler bei einer Radtour an der Mosel erfuhr. Herzog knöpfte sich die Rebsorte Domina vor, für die es bislang noch keine wissenschaftliche Untersuchung zu dieser Fragestellung gab. Der Schüler stellte fest, dass die klassische Maischevergärung mit Reinzuchthefen den farbintensivsten Tropfen ergab, und erzielte damit nicht nur den dritten Platz im Fachbereich Biologie, sondern bestimmt auch großes Interesse bei Winzern, die mit dieser Rebsorte arbeiten.

SPRACHENTWICKLUNG

Der Sprachentwicklung bei Kindern widmete sich Niloufar Rahi (18) aus Königstein (Taunus). Ihr Interesse für dieses Thema erwachte, als ihre kleine Kusine sprechen lernte. Sie beobachtete, dass Kinder sehr schnell lernen, einfache Sätze zu bilden, und dabei Subjekt, Prädikat und Objekt scheinbar instinktiv richtig anordnen.

Rahi wollte erfahren, woher wir beim Sprechenlernen wissen, welche Wörter zu welcher Kategorie gehören. Dazu erfand sie in einem linguistischen Experiment eine Kunstsprache – Dreiwortsätze aus einsilbigen Wörtern. Rahi stellte fest, dass Testpersonen allein auf Grund der sich wiederholenden Muster in der Reihenfolge Rückschlüsse auf Wortkategorien ziehen konnten und in der Lage waren, aus den Silben neue Sätze zu bilden. Sie erhielt für diese Arbeit eine Einladung zur Nobelpreisverleihung.

Erwähnenswert ist neben der wissenschaftlichen Leistung, dass die Schülerin ihr Projekt während der Sommerferien an der berühmten Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) durchführte. »Als ich begann, mich für Sprachentwicklung zu interessieren, habe ich im Internet recherchiert, wo dieses Thema erforscht wird, und habe angefragt, ob ich mein Projekt dort durchführen kann«, erinnert sich die Schülerin. Damit liefert sie den Beweis: Für gute Forschungsprojekte braucht es eben nicht nur zündende Ideen, sondern auch den Mut und das Selbstbewusstsein, diese umzusetzen und sich mit seinen Fragen auch an erfahrene Wissenschaftler zu wenden. ◁

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

AUTORIN

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893113.

PALÄONTOLOGIE

Schätze aus dem Schiefer

Ein opulenter Begleitband zur großen Sonderausstellung »Messel on Tour« zeigt die 125 spektakulärsten Fossilien aus der Unesco-Weltnaturerbestätte.

Fast wäre ein einzigartiges Fenster zur Erd- und Lebensgeschichte des frühen Tertiärs unwiderruflich zugeschlagen worden, weil man die etwa 1,5 Quadratkilometer große Grube Messel nordöstlich von Darmstadt nach dem Ende des Tagebaubetriebs ernsthaft unter Müllbergen verschwinden lassen wollte. Zum Glück kam es anders: Nach dem Auslaufen des Bergbaus 1972 wurde ein Planfeststellungsbeschluss zur Deponienutzung nach massiven Protesten aus Bürgerschaft und Wissenschaft gerichtlich aufgehoben. Das Land Hessen übernahm 1991 das ehemalige Grubengelände und stellte es der Wissenschaft zur Verfügung. Im Dezember 1995 wurde es als weltweit dritte Fossilienlagerstätte in die Unesco-Liste der Weltnaturerbestätten aufgenommen.

In der Tat gibt die »Fundgrube« Messel einzigartige Einblicke in die Lebensbedingungen vor knapp 50 Millionen Jahren – jene ereignisreiche Zeit, in der insbesondere die erfolgreiche Evolution der Säugetiere begann. Das Hessische Landesmuseum in Darmstadt zeigt nun, bevor es zur Renovierung vorübergehend geschlossen wird, in einer Sonderausstellung 125 herausragende Originale, darunter den weltberühmten Ameisenbären *Eurotamandua joresi* aus einer hochkarätigen Privatsammlung von Messel-Fossilien, die seit 2001 im Besitz des Hauses ist.

Der zur Ausstellung erschienene Begleitband breitet alle naturkundlichen und wissenschaftshistorischen Fassetten der bedeutenden Fossilienlagerstätte aus. Der schon bald nach der Entdeckung der »Messeler Braunkohle« 1890 eröffnete Tagebau lieferte aus Millionen Tonnen Ölschiefer nicht nur den Gegenwert von etwa fünf Supertankerladungen Rohöl, sondern vor allem auch eine Fülle einmalig erhaltener Fossilien aus dem Alttertiär.

Erst in den 1960er Jahren standen allerdings geeignete Präparationsverfahren zur Verfügung, um die Schätze aus dem Schiefer vor dem raschen Trocknungszerfall zu grauem Grus zu bewahren. Seit 1966 führen das Senckenbergmuseum Frankfurt und das Hessische Landesmuseum wissenschaftliche Grabungen durch. Bis heute sind annähernd 1500 wissenschaftliche Publikationen und fast ein Dutzend Bücher über Messel-Fossilien erschienen.

Der reichhaltig ausgestattete Bildband lässt ebenso wie die Ausstellung die damalige tropische Landschaft geradezu lebendig Gestalt annehmen. Funde aus dem Messel-See selbst, der sich in dem ursprünglich über 200 Meter tiefen Krater eines Maarvulkans zwischen heutigem Oberrheingraben und Odenwald anstaute, umfassen Knochenfische, Amphibien, Schildkröten, Krokodile und wasserlebende Säugetiere in geradezu fantastisch detailreicher Erhaltung. Fossil vertreten sind aber auch Flora und Fauna des einst umgebenden Urwalds – jeweils dargestellt für den Urwaldrand und seine Lichtungen (mit der Messel-Legende Urtapir), den Urwaldboden (darunter die berühmten Urpferdchen) und den Kronenbereich (unter anderem mit Kletterechsen und Fledermäusen).

Ergänzend zur Ausstellung bietet der Band in 27 Fachbeiträgen renommierter und an der Messel-Forschung maßgeblich beteiligter Autoren eine ausführliche Beschreibung und Deutung des Fundguts auf dem neuesten wissenschaftlichen Stand.

»Messel on Tour« ist bis Ende September 2007 in Darmstadt zu sehen und wird dann als Wanderausstellung an die Stationen Leiden, Oslo, Hannover, Stuttgart, Basel, Münster und Pittsburgh gehen.

Für das Originalerleben (auch) von spektakulären Fossilien gibt es im Allgemeinen keinen vollwertigen Ersatz. Beim vorliegenden Begleitband könnten allerdings Zweifel aufkommen.

Bruno P. Kremer

Der Rezensent lehrt am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln.

Gabriele Gruber, Norbert Micklich (Hg.)
Messel
Schätze der Urzeit
Theiss, Stuttgart 2007. 160 Seiten, € 24,90

Dieses Fossil eines Doppelhundszahn-Krokodils *(Diplocynodon darwini)* wurde durch Ausgießen mit Epoxidharz gehärtet und dann aus dem umgebenden Ölschiefer freipräpariert. Es liegt teilweise freitragend auf dem Kunstharzträger, durch den hindurch auch die Rückseite sichtbar ist.

Die Macht der Synapsen

Einst erhielt Eric Kandel den Nobelpreis für seine Forschungen über das Nervensystem. Jetzt liegt eine Sammlung seiner Aufsätze vor.

Eric Kandel ist der Mensch, dem wir bahnbrechende Erkenntnisse über die Neurophysiologie des Lernens verdanken. Seine Forschungen begannen Anfang der 1960er Jahre an einem Tier, das für seine Lernfähigkeit bis dahin nicht besonders bekannt war: der Meeresschnecke *Aplysia californica*. An ihr entdeckte er, dass Lernen von Veränderungen der Synapsenstärke abhängt. Eine vorübergehende Veränderung führt zum Kurzzeitgedächtnis, während das Wachstum neuer synaptischer Verbindungen das Gedächtnis verlängert. Für seine Forschungen erhielt er im Jahr 2000 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

In Wien geboren, floh Kandel 1939 im Alter von neun Jahren mit seiner jüdischen Familie vor den Nationalsozialisten in die USA. Er studierte zunächst Geschichte an der Harvard-Universität, bevor er sein Interesse für die Neurowissenschaften entdeckte. Geleitet von dem Wunsch, Psychoanalytiker zu werden, ließ er sich an der Harvard Medical School in Psychiatrie ausbilden. Doch dann änderte er die Richtung und widmete sich der biologischen Forschung. Im Jahr 1974 kam er als Gründungsdirektor des Zentrums für Neurobiologie und Verhalten an die Columbia-Universität in New York, an der er bis heute aktiv ist. Das vorliegende Buch versammelt Aufsätze Kandels, kommentiert von namhaften Fachkollegen.

»Psychotherapie und die einzelne Synapse« heißt Kandels berühmter Aufsatz aus dem Jahr 1979. Der Titel spielt auf die Spannung an, die damals innerhalb der Psychiatrie zwischen biologischen und psychologischen Ansätzen herrschte und teilweise heute noch herrscht. Das Misstrauen saß tief, wie Gerhard Roth, Professor für Verhaltensphysiologie an der Universität Bremen, im Vorwort der deutschen Ausgabe erklärt: Für die Hirnforscher war die Lehre Freuds der Inbegriff unwissenschaftlichen Denkens; umgekehrt waren sie in den Augen der Psychoanalytiker nur Leute, die allem Seelischen mit dem Metermaß auf die Pelle rücken wollten. Kandel bringt seine eigene Position, den »neurobiologischen Reduktionismus«, so auf den Punkt: »Was wir als unseren Geist verstehen, ist ein Ausdruck der Funktionsweise unseres Gehirns.« Zack. Das sitzt.

Im Aufsatz »Biologie und die Zukunft der Psychoanalyse« versucht Kandel beide miteinander zu versöhnen, indem er Übereinstimmungen zwischen ihnen aufzeigt. So bestätigen einige Ergebnisse der Neurowissenschaft inzwischen psychoanalytische Annahmen, zum Beispiel die Existenz unbewusster geistiger Prozesse und die Wichtigkeit frühkindlicher Erfahrungen.

»Von der Metapsychologie zur Molekularbiologie« handelt von der Angst. Beim Menschen wohlgemerkt – untersucht hat Kandel aber wieder die Meeresschnecke *Aplysia*. Er hat nachgewiesen, dass gewisse Gene und deren Proteine, die am Lernen – auch von bedrohlichen Informationen – beteiligt sind, sowohl bei *Aplysia* als auch bei Insekten und Säugetieren wie zum Beispiel Mäusen die gleichen sind.

»Die Molekularbiologie der Gedächtnisspeicherung« basiert auf der Rede Kandels anlässlich seiner Nobelpreisverleihung im Jahr 2000. In ihr beschreibt er nochmals seinen Werdegang und die Geschichte seiner Forschung. Der letzte Aufsatz »Gene, Gehirne und das Selbstverständnis des Menschen« ist seine Ansprache bei einer Promotionsfeier der Columbia-Universität im Jahr 2001.

Uff! Wenn man dies alles gelesen hat, ist man ein gehöriges Stück weiser als zuvor. Das Buch ist ein echtes Schwergewicht, voller interessanter Fakten, Einsichten und unkonventioneller Ideen. Trotzdem fühlt man sich nicht überfordert, denn die Kommentatoren der einzelnen Aufsätze nehmen den Leser an der Hand und führen ihn durch die Forschung und das Leben Kandels.

Im Buch geht es um mehr als Neurobiologie und Psychoanalyse. Es ist ein Werk über das letzte große Rätsel der Wissenschaft – den menschlichen Geist. Was dem 20. Jahrhundert das Gen, das wird dem 21. Jahrhundert der Geist sein, prophezeit Kandel. Das menschliche Genom ist entschlüsselt; die Erforschung der rund 200 Milliarden Gehirnzellen aber hat gerade erst begonnen.

Kandels Forschung trägt einen großen Teil dazu bei und berührt grundlegende Fragen der Menschheit: Gibt es einen freien Willen? Denken wir oder werden wir gedacht? Gibt es eine Trennung von Gehirn und Geist? Das sind schwere Kaliber, aber Kandel nähert sich ihnen erfrischend unbefangen und frei von ideologischem Überbau. Für ihn gibt es lediglich Nervenzellen und die Verbindungen zwischen ihnen – alles Geistige ergibt sich dann aus den elektrischen Impulsen in unserem Gehirn. Der Beweiskraft seiner wissenschaftlichen Schilderungen kann man sich kaum entziehen.

Dabei belässt er es aber nicht: Er führt seine Gedanken weiter zu einem neuen Humanismus und formuliert die Hoffnung, dass die Einsicht in unsere biologische Beschaffenheit vieles besser machen wird. Durch die genaue Kenntnis der genetischen Veranlagung eines jeden könnte die medizinische Versorgung individueller werden. Das wachsende neurobiologische Wissen könnte zu einem besseren Verständnis von Psychotherapie und ihrer Wirkung führen; Psychopharmaka könnten dann zielgerichteter und sparsamer eingesetzt werden. Wenn Gespräche die Hirnphysiologie beeinflussen können, wozu dann den Patienten noch die Nebenwirkungen der Medikamente zumuten?

Dazu müssten sich allerdings die Psychoanalyse und die Neurobiologie miteinander anfreunden. »Sehen wir die Anfänge eines Dialogs?«, fragt Kandel auf S. 168. Freud selbst würde sich einen solchen wohl wünschen, hatte er doch seine Karriere mit dem Studium des Nervensystems begonnen, bevor er sich dem menschlichen Geist widmete. Der amerikanische Psychologe und Neurowissenschaftler Joseph LeDoux, einer der Kommentatoren in diesem Buch, unterstellt Freud sogar: »Würde er heute leben, wäre er sicherlich ein großer Bewunderer von Eric Kandels Forschung und Schriften.«

Anke Römer

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mannheim.

Eric R. Kandel
Psychiatrie, Psychoanalyse und die neue Biologie des Geistes
Aus dem Amerikanischen von Michael Bischoff und Jürgen Schröder.
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2006.
342 Seiten, € 28,–

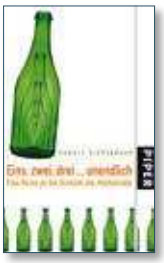
Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

MATHEMATIK

Remake des Klassikers

Nach dem Vorbild von George Gamows »One, two, three … infinity« bietet uns Rudolf Kippenhahn eine vergnügliche Rundreise durch das Unendliche.



Rudolf Kippenhahn ist der große alte Mann der deutschen Astrophysik – und sein Enkel Alex ist auch ziemlich genial. So wie er in diesem Buch geschildert wird, beschwert er sich allenfalls, wenn Großvater ihm etwas zu Einfaches erzählt, und begreift mit staunenswerter Leichtigkeit, was noch vor hundert Jahren großen Geistern wie Georg Cantor (1845 – 1918), dem Schöpfer der modernen Mengenlehre, gewaltiges Kopfzerbrechen bereitet hat.

In seinen – fiktiven – Dialogen mit dem Enkel unternimmt Kippenhahn nichts weniger als einen Parforceritt durch die bessere Schulmathematik und gelegentlich darüber hinaus: nicht »an die Grenzen der Mathematik«, wie der Untertitel behauptet, sondern mitten hinein in deren wohlgesicherten Grundbestand. Man trifft die lieb gewordenen Bekannten wie Achilles, der die Schildkröte eben doch einholt, den kleinen Carl Friedrich Gauß, der die Zahlen von 1 bis 100 so elegant und schnell zusammenzählt, den Dorfbarbier, der alle Dorfbewohner rasiert, die sich nicht selbst rasieren, und an der Frage verzweifelt, ob er das Messer an sich selbst anwendet, und den Portier von Hilberts Hotel mit den unendlich vielen Zimmern, der auch bei voll belegtem Haus nie einen Reisenden abweisen muss, aber seine Gäste gelegentlich zu ausgedehnten Nachtwanderungen nötigt.

Und natürlich Archimedes! Es geht dem Autor nicht um seine berühmte Nacktszene und die zugehörige Entdeckung, sondern um die Berechnung der Fläche innerhalb der Kreislinie und unterhalb des Parabelbogens. Hier und an anderen Stellen treffen das mathematische Konzept vom Unendlichen und die Realität aufeinander: Es gibt nur endlich viele Sandkörner in jeder Kugel; feiner als in einzelne Atome kann man Materie, zumindest mit Hausmitteln, nicht zerlegen. Wozu legt man sich – mit Hilfe des Induktionsprinzips – unendlich viele natürliche Zahlen zurecht, zerteilt die Zahlengerade beliebig fein durch rationale Zahlen und macht sich Gedanken über die noch unendlich zahlreicheren irrationalen Zahlen, die irgendwie dazwischenliegen? Weil man sonst gewisse, eigentlich endliche Phänomene wie das exponentielle Wachstum und die ganze Quantenmechanik nicht versteht, sagt Kippenhahn und erspart seinem Enkel wie dem Leser die genaue Erklärung: Man rechnet mit dem Unendlichen nicht, weil es unvermeidlich wäre, sondern weil es viel einfacher ist als der Umgang mit den realen endlichen Größen.

Das gilt auch für den Ausflug in das Spezialgebiet des Autors. Auf die Frage, ob das Weltall unendlich ist oder nicht, gibt es keine physikalisch sinnvolle – durch Beobachtungen verifizierbare – Antwort. Aber für viele Zwecke der Astrophysik darf man das Universum getrost für unendlich halten.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Rudolf Kippenhahn
Eins, zwei, drei … unendlich
Eine Reise an die Grenzen der Mathematik
Piper, München 2007. 244 Seiten, € 18,–

TECHNIKGESCHICHTE

Die Herrscher der Maschine

Kaiser und Könige haben die Dienste der Ingenieure zu schätzen gewusst; Kaiser und König haben ihnen zu Ehren einen Prachtband herausgegeben.

Ebenso hat der Mensch die völlige Herrschaft über alle Güter der Erde; wir ziehen Nutzen aus ebenem und bergigem Gelände, uns gehören die Flüsse und Seen, wir säen Getreide und pflanzen Bäume; wir leiten Wasser auf unsere Ländereien und machen sie dadurch fruchtbar, wir dämmen Flüsse ein … und leiten sie ab, ja wir versuchen mit unseren Händen inmitten der Natur gleichsam eine zweite Natur zu schaffen.«

Mit solch stolzen Worten pries Cicero zur Zeit der römischen Republik die Menschen – oder vielmehr jene wenigen unter ihnen, die in die Natur einzugreifen und deren Kraft zu nutzen vermögen: die Ingenieure.

Eine »Geschichte des Ingenieurs« zu schreiben ist schon deswegen nicht einfach, weil der Berufsstand nicht einfach zu definieren ist und in verschiedenen historischen Epochen sehr verschieden gesehen wurde. Für den vorliegenden Band, der zum 150. Jubiläum des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) erscheint, haben die Autoren das Ingenieurwesen mit den ersten Hochkulturen beginnen lassen und jeweils nur die Zentren der Entwicklung gewählt. Ein gelungener Kompromiss, der allerdings dem Leser einen Zeitraum von 6000 Jahren zumutet!

Das erste und kürzeste Kapitel fokussiert auf den Alten Orient: Mesopotamien, Persien, die Levante. Königliche Bauprojekte stehen im Vordergrund; über die einzelnen Ingenieure gibt es nur bruchstückhaftes Wissen. In der griechischen und römischen Antike dagegen wird bereits deutlicher unterschieden zwischen Architekten, Ingenieuren und Handwerkern, auch werden herausragende Personen bekannt.

Im Mittelalter und der frühen Neuzeit diversifizieren sich Aufgaben und Berufe; Regeln zur Realisierung einzelner Gewerke wurden stets im persönlichen Kontakt weitergegeben. Kurz geht der Autor Marcus Popplow auf außereuropäische Entwicklungen ein. Bemerkenswert die Anfänge des Patentwesens. Neue Darstellungsformen erobern ihren Platz, gedruckte Bücher gehen in die Massenfertigung; erste Ansätze zur Formalisierung technischer Forschung zeigen sich.

Zwei ausführliche Kapitel beschreiben die Entwicklungen in Großbritannien und den Vereinigten Staaten einerseits sowie in Frankreich und Deutschland andererseits zwischen 1750 und 1945. Überraschend groß sind die kulturellen Unterschiede in Ausbildung, Leitbild, Karriere und beruflicher Organisation.

Die beiden nachfolgenden Kapitel setzen sich mit den unterschiedlichen Wegen aus-

einander, welche die Ingenieure in West- und Ostdeutschland nahmen, und geben auch einen Einblick in technische Entwicklungen. Rechts-, Hochschul-, Sozial- und Staatspolitik dominieren die Tätigkeit des Ingenieurs ebenso wie die Darstellung.

Zum Abschluss schildert der weit gereiste Ingenieur Helmut Winkler sein überdurchschnittlich vielfältiges Berufsleben von der Nato-Waffentechnik bis zum akademischen Wissenstransfer in Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländer.

Das Buch ist so heterogen wie sein Thema, denn in »dem Ingenieur« verzahnen sich naturgemäß Berufsbild, Personen, Maschinen, Projekte und Wissenschaft. Das unklare Bild des Ingenieurs wird abgestaubt, der Glanz darunter sichtbarer.

Wer aber hat das Buch entworfen, die in ihrem Fach überaus kompetenten Autoren (die meisten sind Hochschullehrer) oder Redakteure? Die informativen Kapitel, flüssig geschrieben in bestem Deutsch, haben keinen gemeinsamen Aufbau und unterscheiden sich in Stil, Ausführlichkeit, Zahl und Qualität der Abbildungen. Das letzte Kapitel, aus der Ich-Position geschildert, gibt zwar interessante Einblicke in den Wissenschaftsbetrieb, allerdings sind die Abbildungen weit gehend entbehrlich. Wozu soll der Leser sich drei nigerianische Generäle oder das Eingangstor einer Universität anschauen? An Stelle akademischer Histörchen wäre hier der Platz für ingenieurtechnische UN-Arbeit gewesen. Auch vermisst der Leser die erfolgreiche Arbeit von Ingenieuren in der EU sowie den Ausblick auf die Zukunft, beispielsweise in der europäischen Raumfahrtagentur.

Die zweite Brücke über den Hugli in Kalkutta wurde 1978 bis 1993 unter der Leitung von Jörg Schlaich (Universität Stuttgart) gebaut.

Was ist, wenn man mit dem Buch tatsächlich arbeiten will? Gut: Literaturhinweise, Personen- und Sachregister; schlecht: fehlende Zwischentitel verzögern die Navigation erheblich; viel Platz geht in der kaum genutzten Marginalspalte verloren; die Abbildungstexte sind fast alle zu kurz. Die Schlussredaktion war nahezu perfekt; es verblieben nur vereinzelte Schreibfehler und unnötige (»Sinn machende«) Anglizismen.

Herausgekommen ist, trotz punktueller Schwächen, ein sehr lesenswerter Überblick über einen der vielfältigsten Berufe überhaupt. Dieser Band bietet die bislang beste Zusammenfassung und wird zweifellos ein Standardwerk für Lehrkräfte und Bibliotheken werden.

Ein Teil der Lesbarkeit ergibt sich daraus, dass nicht allein die Techniken des Bau- oder Militärwesens im Vordergrund stehen, sondern die Menschen. Ein Beispiel: Mittelalterliche Waffenmeister gehörten zu jenen Fachkräften, die gelegentlich auch mal die Seite wechselten, wenn ein besseres Angebot kam – oder auch nach einer Schlacht; galt ihr Wissen schließlich als wertvolle, quasi neutrale Ressource, die nicht verschwendet werden sollte. Im Buch wird von einer Begebenheit aus dem Jahr 1333 erzählt, als die Burg Schwanau im Elsass erobert wurde: Die Sieger waren von der Effektivität des feindlichen *magister machinae* so angetan, dass sie ihm die zweifelhafte Ehre erwiesen, ihn in eines seiner eigenen Wurfgeschütze zu packen und in Richtung Mond zu schießen. Bis heute, wenn auch nicht überall so gravierend, bleibt das wohl Berufsrisiko.

Frank G. Gerigk

Der Rezensent ist Diplomgeologe und freier Redakteur mit Themenschwerpunkt Baubranche. Er lebt in Leinfelden-Echterdingen.

Walter Kaiser, Wolfgang König (Hg.)
Geschichte des Ingenieurs
Ein Beruf in sechs Jahrtausenden
Hanser, München 2006. 351 Seiten, € 29,90

www.fischerverlage.de

Wer denken will, muss fühlen.

Basierend auf den neuesten Erkenntnissen zeigt der Bestsellerautor Bas Kast, wie sehr die Gefühle integraler Bestandteil unseres Denkens sind und wie sehr wir uns darauf verlassen können. Wenn wir unsere irrationalen Seiten kennen und zu nutzen wissen, können wir die kreativen Kräfte in uns wecken – und kommen selbst bei komplexen Entscheidungen zu Ergebnissen, die uns glücklich machen.

224 Seiten, gebunden mit Schutzumschlag, € 17,90 (D); sFr 32,20

Ein Buch von S. FISCHER

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Jude, Ungar und Wissenschaftler

István Hargittai gibt einen sehr individuellen Blick auf die Schicksale von Wissenschaftlern seiner Generation.

István Hargittai lebt und arbeitet in Budapest, jener Stadt, in der er 1941 in eine Epoche unvergleichlicher Schrecken hineingeboren wurde. Sein Forschungsgebiet ist die Strukturchemie, mit besonderem Interesse für die breit gefächerten Anwendungen des Symmetriebegriffs. Im vorliegenden Buch beschreibt er seinen ganz persönlichen Weg zur Wissenschaft, eingebettet in eine Sammlung ausgewählter Forscherbiografien, die diese »Autobiografie« zugleich zur Chronik eines Fachgebiets machen.

Dem Autor, der über Jahrzehnte recherchiert und zahlreiche Interviews mit Kollegen geführt hat, geht es vor allem um die Zusammenhänge von Individualität und Forschung. Obwohl wissenschaftliche Ergebnisse unabhängig von der Persönlichkeit eines Forschers sein sollten, verrät jede Arbeit dennoch »einen eigenen Stil«. Für Hargittai jedenfalls ist es keineswegs bedeutungslos, »auf welche Weise jemand sein Forschungsthema wählt und wie er seine Ergebnisse publiziert«.

Die 19 Kapitel des Buchs tragen jeweils den Namen eines Nobelpreisträgers; dabei hat Hargittai ausschließlich Wissenschaftler ausgewählt, mit denen er sich auf irgendeine Weise persönlich verbunden weiß. Zu diesem erlesenen Kreis gehören Linus Pauling, James Watson, Nikolai Semjonow, Marshall Nirenberg, Rudolf Mößbauer, Frederick Sanger und Bruce Merrifield.

Hargittai stellt jeden seiner Helden zunächst vor und erläutert die Bedeutung seiner wissenschaftlichen Beiträge. Doch dann gehen die einzelnen Kapitel zumeist rasch zu weiteren Forscherpersönlichkeiten und ihren Entdeckungen über und verbinden das Gesagte mosaikartig mit dem Schicksal des Autors und seinen Befindlichkeiten: Als Mensch ist Hargittai geprägt von seiner jüdischen Herkunft, als Ungar ist er stolz auf den überragenden Beitrag seiner Nation zur Erfolgsstory der modernen Wissenschaften – und als Naturwissenschaftler fühlt er sich einem internationalen »Orden« von »Berufenen« zugehörig.

Hargittai wächst als Halbwaise auf. Sein Vater wird 1942 von ungarischen Faschisten in ein Lager für jüdische Zwangsarbeiter verschleppt und kommt dort ums Leben. Die übrige Familie wird 1944, nach dem Einmarsch der Deutschen, zunächst in einem Getto interniert und dann in ein Konzentrationslager nahe Wien deportiert: »Unser Zug fährt Richtung Auschwitz ab, wird aber unterwegs nach Strasshof (Österreich) umgeleitet.« Hargittai überlebt den Holocaust. Der bewegende Bericht seines älteren Bruders Sándor über jene qualvolle Zeit bis zur Befreiung 1945 gehört zu den dramatischen Höhepunkten dieses Bandes. Hargittai resümiert: »Ich betrachte mich in meinem Leben überwiegend als vom Glück begünstigt, weil ich der Vernichtung entkommen bin und die Deportation überlebt habe.«

Von der deutschen Ausgabe dieses Buchs erhofft sich Hargittai, dass sie dazu beiträgt, die »frühere traurige Beziehung zu Deutschland abzuschließen«. Seinen ursprünglichen Familiennamen »Wilhelm« hat Hargittai bereits 1959 abgelegt, um sich zu seiner Nation zu bekennen: »Ich fühle mich eher als jüdischer Ungar und nicht so sehr als ungarischer Jude.« Auf diese ungarisch-jüdischen Wurzeln, die Hargittai mit vielen Fachkollegen teilt, nimmt er im Lauf der Darstellung immer wieder Bezug. Und in der Tat, die Liste bedeutender ungarischer Forscher, zumal die jener jüdischer Herkunft, ist lang, so lang, dass man der von Hargittai zitierten These vom »Genius loci« – »Das 20. Jahrhundert wurde in Budapest gemacht« – trotz aller Überspitzung gerne folgen will. Die Garde wird von Nobelpreisträgern wie George Olah, Edward Teller, George de Hevesy, Leo Szilard, Dennis Gábor und Eugene Wigner angeführt, gefolgt von so manch weiteren bedeutenden Namen wie etwa Theodore von Kármán, John von Neumann und Michael Polanyi.

Francis Crick lebte länger als von ihm selbst erlaubt

So gesehen, befand sich Budapest durchaus auf Augenhöhe mit Berlin, wohin es denn auch viele der ungarischen Genies zog, bis der aufkommende Nationalsozialismus jener einmaligen Epoche ein jähes Ende bereitete. Dieser Verlust wird einem besonders schmerzlich bewusst, wenn man liest, wie etwa Eugene Wigner als Student jene Seminare für Physik an der Berliner Universität der frühen 1930er Jahre erlebte: In der ersten Reihe nahmen die »legendären Giganten der Physik« Platz, die Nobelpreisträger Albert Einstein, Max Planck, Max von Laue und Walther Nernst; dahinter saßen dann die »jungen Titanen«, die späteren Nobelpreisträger Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli, sowie Dennis Gábor, der Erfinder der Holografie, Wigner selbst und einige weitere Hoffnungsträger.

»Bereits in meiner Oberschulzeit«, bekennt Hargittai, »hatte ich mich mit der Chemie verlobt.« Doch der Weg zum Professor für Chemie und Mitglied der Ungarischen Akademie der Wissenschaften war alles andere als leicht. Einer rasanten Karriere im kommunistischen Ungarn stand nicht nur die falsche Klassenzugehörigkeit entgegen (der Vater war promovierter Jurist), sondern auch unverhohlener Antisemitismus. Dennoch hadert Hargittai nicht mit seinem Schicksal, sondern ist froh, gerade noch jener Forschergeneration anzugehören, die rückblickend behaupten kann: »Es gab Zeiten, in denen Forschung eine Berufung war, heute ist sie eher zu einem Industriezweig geworden. Die meisten Forscher befassen sich mit Routinearbeiten, bei denen der individuelle Einfallsreichtum keine große Rolle spielt.«

Gesprächspartner Hargittais, von links nach rechts: James Watson (Nobelpreis für Medizin 1962), Rudolf Mößbauer (Physik 1961), Linus Pauling (Chemie 1954, Frieden 1962), Frederick Sanger (Chemie 1958 und 1980)

Nicht alle biografischen Vernetzungen Hargittais sind gelungen. Der selbstauferlegte konzeptionelle Zwang, nur Nobelpreisträgern ein Kapitel zuzugestehen, führt hin und wieder zu seltsamen Konstellationen und missglückten Übergängen. So berichtet Hargittai etwa im Kapitel »Manfred Eigen« über das erschütternde Lebensschicksal von László Kiss, dem ungarisch-jüdischen Pionier der Elektrochemie – mit der mehr als mageren Begründung, dass der »Krieg auch das Leben von Eigen ungünstig beeinflusst« hat. Kiss, Jahrgang 1928 und somit nur ein Jahr älter als Eigen, gehörte zu jenen Zwillingen, die in Auschwitz für die »Untersuchungen« des Hauptsturmführers Josef Mengele selektiert wurden. Weitaus mehr also als »ungünstige« Lebensumstände, die zudem nichts mit Manfred Eigens Leben und Werk zu tun haben.

Ein wirkliches Ärgernis, mehr noch ein Rätsel, ist das Kapitel »James Watson«. Dessen vergnügliche und selbstverliebte Tipps, wie man ein erfolgreicher Wissenschaftler wird – »Vermeide den Umgang mit dummen Menschen!« und »Setze alles daran, in die Gesellschaft von Menschen zu kommen, die klüger sind als du selbst!« – lässt man sich ja noch gern gefallen. Von ganz anderem Kaliber sind indes die Ungeheuerlichkeiten, die sein Nobelpreisträger-Kollege Francis Crick 1968 in einem öffentlichen Vortrag vorschlug: Ärzte sollten ein Neugeborenes »erst am zweiten Tag nach seiner Geburt zum Lebewesen deklarieren dürfen«, damit der Gesellschaft die Betreuung von Kindern mit gravierenden Geburtsfehlern erspart bleibe. Und der Staat dürfe »keine Gelder für die Versorgung von Personen aufwenden …, die das 80. Lebensjahr überschritten haben«. Crick, der 2004 mit 88 Jahren verstarb, hat seine Einlassungen später abgemildert, was wiederum Kollege Watson »nicht für glücklich« hält. Schließlich könnten doch nur extreme Meinungen die Debatte in die richtige Richtung lenken.

Leider tritt Hargittai diesem Aufruf zur Selektion vermeintlich unwerten Lebens nicht entgegen – zu Lasten seiner eigenen Glaubwürdigkeit: Was sind jene in diesem Buch wiederholt erhobenen humanen Ansprüche eigentlich wert, wenn den eugenischen Fantasien à la Watson & Crick rein gar nichts entgegengesetzt wird?

Trotz der genannten Mängel und Widersprüche ist diese höchst eigenwillige und authentische Darstellung nicht zuletzt wegen ihrer jüdisch-ungarischen Perspektive für deutsche Leser von besonderem Interesse. Hier hat sich ein Vertreter jener Generation von Forschern zu Wort gemeldet, für die die vorbehaltlose Suche nach wissenschaftlicher Erkenntnis noch untrennbar mit der Suche nach dem Sinn des eigenen Lebens verbunden ist. Ein empfehlenswertes Buch – vor allem für Leser, die sich gern daran erinnern lassen, dass Wissenschaft von Menschen gemacht wird.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

István Hargittai
Wege zur Wissenschaft
Ein ungarischer Forscher berichtet
Aus dem Ungarischen von Manfred Stern.
Lj-Verlag, Freiburg 2006. 344 Seiten, € 19,90

PREISRÄTSELLÖSUNG

Lösung zu »Die Könige von Pontomanien« (Juni 2007)

Der gesuchte König ist Phobias XVIII. Der Schlüssel zur Lösung ist die Tatsache, dass der König im statistischen Mittel alle Straßen (Heerstraßen und Brücken) Pontomaniens gleich häufig benutzt, und zwar in jeder der beiden Richtungen. Um dies einzusehen, zählen wir mit, wie oft der (beliebig langlebige) König eine gewisse Burg B besucht. Teilen wir die Anzahl der Besuche auf Burg B durch die Anzahl aller bisher inspizierten Burgen, so nähert sich der Bruch immer mehr der Wahrscheinlichkeit p für den Aufenthalt auf Burg B an. Auf jeder der n von B ausgehenden Straßen reist der König dann, weil gewürfelt wird, mit der Wahrscheinlichkeit p/n ab.

Nehmen wir nun an, die Straße zwischen zwei benachbarten Burgen B_1 und B_2 würde in der Richtung $B_1 \rightarrow B_2$ häufiger benutzt als in der Gegenrichtung. Dies bedeutet $p_1/n_1 > p_2/n_2$. Da der König in B_2 genauso oft abreist wie anreist, hat B_2 mindestens einen weiteren Nachbarn B_3, zu dem er in Richtung $B_2 \rightarrow B_3$ häufiger reist als in Gegenrichtung: $p_2/n_2 > p_3/n_3$, und so fort: Wir erhalten eine Kette von Burgen $B_1, B_2, B_3, \ldots$, die nicht in sich geschlossen sein kann, weil der Wert von p/n immer weiter abnimmt. Da es nur endlich viele Burgen in Pontomanien gibt, endet die Kette bei einer Burg, die häufiger betreten als verlassen wird. Das ist aber unmöglich. Folglich ist die Annahme falsch, und der König nutzt jeden Straßenanschluss einer Burg mit derselben Wahrscheinlichkeit zur An- wie zur Abreise.

Da jeder der untereinander gleich wahrscheinlichen Abreisewege von einer Burg aber auch Anreiseweg zu einer anderen Burg ist, folgt: Der Wert p/n ist für alle Burgen derselbe, das heißt, die Wahrscheinlichkeit p für den Aufenthalt des Königs auf Burg B ist proportional zur Anzahl n der Straßenanschlüsse von B.

Sei b_1 (b_2, b_3) die Anzahl der Burgen in Pontomanien mit 1 (2, 3) Anschlüssen, so wird der König pro Reise im statistischen Mittel jede der b_1 Burgen (also auch die Stammburg) an einem Tag besuchen und jede der b_2 (b_3) Burgen an zwei (drei) Tagen. Das macht zusammen pro Reise eine mittlere Anzahl von $d = b_1 + 2b_2 + 3b_3$ inspizierten Burgen.

Der König verlässt jede der b_2 Burgen an einem von zwei Tagen nicht auf dem Anreiseweg, jede der b_3 Burgen an zwei von drei Tagen. Insgesamt sind das pro Reise $a = b_2 + 2b_3$ Burgen. Nach Aufgabenstellung ist $d = 730$ und $a = 388$; daraus ergibt sich die Anzahl aller Burgen zu $b_1 + b_2 + b_3 = d - a = 730 - 388 = 342$.

Sei m die Nummer des gesuchten Königs. Zu seiner Zeit gibt es $1 + 2 + 3 + \ldots + m$ Brücken mit je zwei Burgen. Also ist

$2 \cdot (1 + 2 + 3 + \ldots + m) = m \cdot (m + 1) = 342$

und schließlich $m = 18$.

Der Gewinner des »Official Cosmonauts Chronograph« ist Christoph Bartoschek, Brühl.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

Die Anfangsaufstellung in Chex: in der ersten Reihe von links nach rechts Springer, König, Läufer, Turm, in der Reihe davor fünf Bauern

EDELBERT WIEDMANN

BRETTSPIEL

Kleiner, schneller, aggressiver: Schach auf dem Sechsecksbrett

Edelbert Wiedmanns Variante mit der halben Mannschaft und auf ungewohntem Feld bietet einen ganz eigenen Reiz.

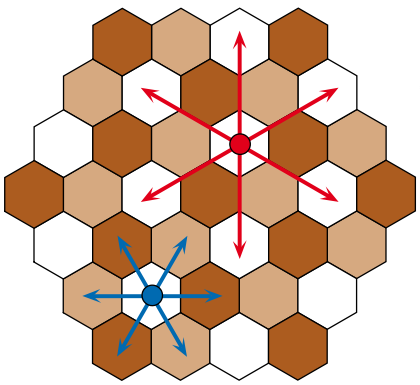
Von Christoph Pöppe

Nach einer Vorstellung, die insbesondere Ende des 19. Jahrhunderts kultiviert wurde, war Chaturanga, ein früher indischer Vorläufer unseres Schachspiels, ursprünglich ein Spiel zu viert. Da sich aber die Spieler zu zwei Parteien zusammenzutun pflegten, wurde ein neues Spiel geschaffen, in dem jeweils zwei der vier »Armeen« von einem einzigen Spieler befehligt werden. Durch die Fusion zweier Mannschaften hatte nun jeder Offizier einen gleichrangigen Kollegen neben sich, eine Besetzung, die sich bei den Türmen, Läufern und Springern des modernen Schachspiels wiederfindet.

Für zwei Chefs nebeneinander war, wie bei Fusionen üblich, kein Platz. Daher wurde einer zur Repräsentationsfigur degradiert und durfte gerade noch einen Schritt vor die eigene Tür gehen, der andere dagegen mit umfassender Macht ausgestattet. So entstanden die Figuren, die wir als König und Dame kennen.

Die Geschichte mag stimmen oder auch nicht; jedenfalls diente sie Edelbert Wiedmann (Bild S. 100 links), einem Architekten und Spiele-Erfinder aus München, als Inspiration für seine eigenen Versuche, eine neue Form des Schachspiels zu finden. Wenn vier Parteien sich auf einem Schlachtfeld tummeln können, hätte ein Schach für drei vielleicht auch seinen Reiz. Um aber drei Armeen gleiche Ausgangspositionen geben zu können, musste ein dreiersymmetrisches Brett her; und damit drängte sich eine bienenwabenförmige Anordnung aus lauter Sechsecken geradezu auf.

Der erste Spieler eines Dreierspiels, der schachmatt gesetzt wird, scheidet aus und hinterlässt seinen Gegnern ein Zweipersonenspiel. Es erwies sich für Wied-



Gerade Züge (blaue Pfeile) und schräge Züge (rote Pfeile) in Chex

ALLE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

mann als schwierig, diesen Abgang so zu gestalten, dass nicht einer der Verbleibenden einen übermäßig großen Vorteil einheimst. So kehrte er zur klassischen Spielerzahl 2 zurück, behielt allerdings die sechseckige Brettform ebenso bei wie den einfachen Figurensatz aus dem Vier-Spieler-Chaturanga. Im Verlauf von 35 Jahren – mit langen Pausen – entstand so das Spiel »Chex«. Der Name »chex« (der Autor schreibt ihn in Kleinbuchstaben) darf nicht nur als Zusammenziehung der englischen Wörter »chess« (Schach) und »hex« (verkürzt für *hexagon*, Sechseck) verstanden werden; er ist auch eine in Jugendsprache formulierte Aufforderung: »Checks doch endlich!«

Das Brett ist vergleichsweise klein. Es besteht aus 37 Sechsecken, die zu einem großen Sechseck der Kantenlänge 4 angeordnet sind (Bild links). Entsprechend war die Anzahl der Figuren zu bemessen.

Das klassische Schachspiel ist unter anderem deshalb so reizvoll, weil statische Kräfte – Figuren blockieren einander den Weg und halten dadurch die Zugmöglichkeiten in Grenzen – und dynamische Kräfte – es gibt immer wieder Raum für überraschende Züge über lange Distanzen – in einem sorgfältig austarierten Gleichgewicht stehen. Das gelingt dadurch, dass in der Ausgangsstellung genau die Hälfte aller Felder (32 von 64) besetzt ist. Chex erreicht diese Zielvorgabe mit dem unvermeidlichen Fehler von einem Feld: Am Anfang sind 18 von 37 Feldern besetzt.

Um das Schachspiel auf die neue Situation zu übertragen, mussten zunächst einige klassische Begriffe mit neuen Bedeutungen versehen werden. Was bedeuten »gerade« und »schräg« auf dem Sechseckbrett? Die Geometrie lässt dem Erfinder da offensichtlich wenig Freiheit, denn andere Schöpfer von Sechseckschachspielen sind zum selben Ergebnis gekommen: Ein gerader Weg verläuft über eine Kette von Sechsecken, die mit ihren unmittelbaren Nachbarn jeweils eine Seite gemeinsam haben. Ein schräger Weg dagegen geht von einem Sechseck zwischen zwei unmittelbaren Nachbarn hindurch bis zum nächsten und dann weiter in derselben Richtung (Bild links). Mit dieser Definition lassen sich manche Zugregeln aus dem Schach wörtlich übernehmen, sind aber in ihrer neuen Bedeutung gewöhnungsbedürftig.

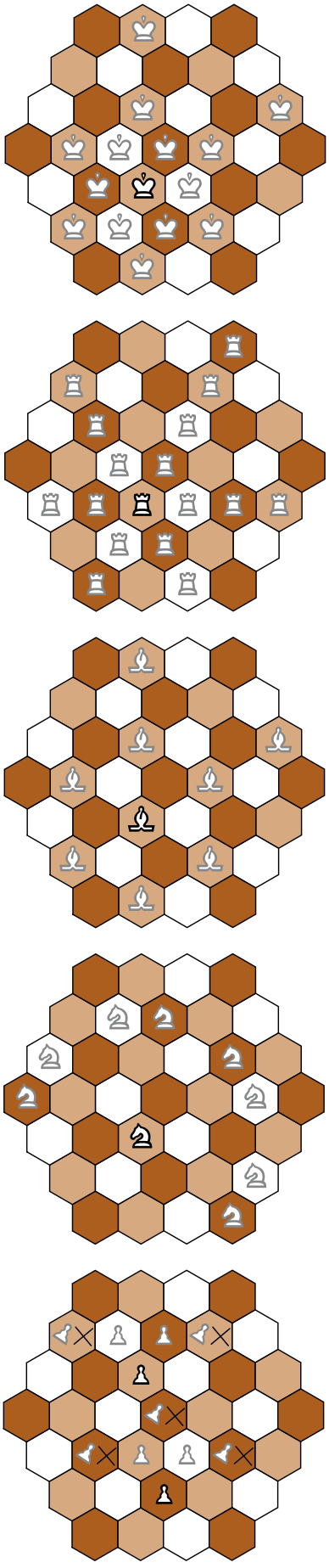
»Der Turm zieht in gerader Linie«, hat aber neuerdings sechs Richtungen, in die er sich fortbewegen kann, und ist damit die stärkste Figur im Spiel; denn eine Dame gibt es ja nicht.

»Der Läufer zieht in schräger Linie«, was ihn zu einer relativ schwachen Figur macht. Im klassischen Schach kann der Läufer, der zu Beginn auf einem weißen Feld steht, sein ganzes Leben lang nur weiße Felder erreichen. Diese Beschränkung gilt für den Chex-Läufer auch, nur trifft sie ihn viel härter. Denn wenn man die Felder des Sechseckbretts analog zu denen des Schachbretts einfärbt – insbesondere sollen nie zwei benachbarte Felder dieselbe Farbe enthalten –, braucht man drei statt zwei Farben; entsprechend ist dem Läufer nicht die Hälfte, sondern nur ein Drittel aller Felder überhaupt zugänglich.

»Vorwärts« sind für den Bauern zwei Richtungen

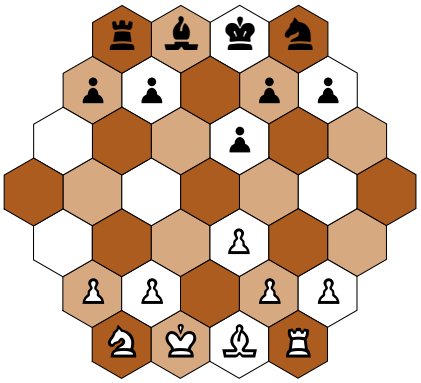
»Der Springer geht in jedem Zug genau einen geraden und einen schrägen Schritt und erreicht damit Felder, die keine andere Figur vom selben Ausgangspunkt in einem Zug erreichen kann.« Umgekehrt kann er keinen Zug einer anderen Figur imitieren. Gerader und schräger Schritt müssen nämlich ungefähr in dieselbe Richtung gehen; ein schräger und ein dazu senkrechter gerader Schritt kämen zwei geraden Schritten gleich, und wenn der Springer zwischen beiden Schritten eine scharfe Wendung einlegte, hätte er im Effekt nur einen geraden Schritt getan. Wie beim klassischen Schach kann keine dazwischenstehende Figur den Springer in seiner Bewegung hindern. Dass seine Reichweite begrenzt ist, macht sich auf dem kleinen Brett nicht besonders störend bemerkbar: Mit zwei Sprüngen kommt er vom einen Ende des Brettes bis zum anderen.

»Der Bauer bewegt sich nur vorwärts um genau einen Schritt, er zieht in gerader und schlägt in schräger Richtung.« Man muss sich allerdings daran gewöhnen, dass dem Bauern im Prinzip zwei gerade Richtungen zur Verfügung stehen. Es gibt zwei Richtungen zum Schlagen, nämlich schräg nach rechts und schräg nach links. Die Richtung genau nach vorne ist eigentlich auch schräg; ▷



Zugmöglichkeiten der Chex-Figuren. Von oben nach unten: König, Turm, Läufer, Springer und Bauer

Der Erfinder Edelbert Wiedmann zusammen mit seinem – mittlerweile verstorbenen – Freund



Frühe Bedrohung: Weiß eröffnet mit einem scheinbar harmlosen Bauernzug; Schwarz antwortet mit dem spiegelbildlichen Zug und bietet dadurch Schach mit dem Läufer.

aber in dieser Richtung darf er nur aus der Grundstellung heraus schlagen. Den Doppelzug aus der Grundstellung heraus gibt es nicht.

Ein Bauer, der die gegnerische Grundlinie erreicht, kann in eine beliebige andere Figur umgewandelt werden. Rein theoretisch könnte sich also ein Chex-Spieler fünf zusätzliche Türme zulegen.

Der König schließlich hat im Gegensatz zu seinem klassischen Kollegen nur eine relativ milde Degradierung erlitten. Er darf sich einen geraden Schritt weit bewegen – oder beliebig viele schräge. Damit gewinnt er eine Beweglichkeit, die den klassischen Schachspieler zunächst überrascht.

Die Rochade folgt den Regeln des klassischen Schachspiels: Der Turm darf einen Schritt nach links wandern; zugleich darf der König, den Turm überspringend, dessen bisherigen Platz einnehmen, wenn beide bis dahin nicht bewegt wurden und der König auf keinem der drei beteiligten Felder bedroht ist.

Kein Gemetzel anrichten

Man sollte sich übrigens vorstellen, dass die Begrenzungskante zwischen zwei benachbarten Feldern »eigentlich« eine Art Korridor ist, über den man als schräg ziehende Figur wandern kann, ohne von den Figuren beiderseits des Korridors behelligt zu werden. Ausnahme: Zwei Bauern gleicher Farbe bilden eine wirksame Durchgangssperre für König und Läufer.

Erste Versuche mit »Chex« enden sehr schnell und sehr überraschend. Wer zu viel in den Bahnen des klassischen Schachspiels denkt, erleidet rasch Schiffbruch, übersieht zum Beispiel nur allzu leicht, dass viele dicht an dicht stehende Figuren dem Läufer noch viele Schlupflöcher lassen – und dem Springer sowieso. Unverhofft greift dieser den König an, der, von seinen Getreuen dicht umgeben, keine Chance zum Ausweichen hat. Oder die Ausweichmöglichkeit, die man für seinen König zu haben glaubte, ist durch einen gegnerischen Bauern versperrt, der viel weiter von Zentrum des Geschehens entfernt steht, als man es aus dem klasssischen Schach gewohnt ist. Wer das Spiel eröffnet, indem er seinen Zentralbauern nach rechts vorne vorrückt, setzt seinen König alsbald dem Angriff des gegnerischen Läufers aus (Bild rechts oben).

Vorrückende Bauern ordnen sich fast von allein zu einer Variante der beliebten Bauernketten: Vorne stehende Bauern werden von schräg hinter ihnen stehenden Kameraden gedeckt und geben diesen beim Vorrücken Deckung. Aber ansonsten bleibt den Heerführern wenig Zeit, ihre Bataillone aufzustellen. Auf dem engen Schlachtfeld ist der Gegner nicht weit, und ehe man sich's versieht, ist die Eröffnung zu Ende und der Kampf in vollem Gang. In den Worten seines Schöpfers verhält sich Chex zum Schach wie ein Sportwagen zu einer geräumigen Limousine.

Manche Schachspieler lieben es, sich die Situation zu vereinfachen, indem sie auf jedes Angebot zum Figurentausch eingehen. Nach einem großen Gemetzel finden die wenigen überlebenden Figuren dann ein viel übersichtlicheres Schlachtfeld vor. Von einer solchen Strategie ist im Chex abzuraten. Wegen der geringeren Figurenzahl hat man wesentlich mehr Anlass, dem Verlust einer einzelnen Figur nachzuweinen; und das Endspiel verläuft bei Weitem nicht in so geregelten Bahnen. Auf einem fast leeren Brett ist es selbst mit einer Überzahl an Figuren enorm schwierig, den König am Davonlaufen zu hindern. Aus diesem Grund hat Wiedmann noch eine spezielle Regel in das Spiel eingeführt: Man muss den König nicht unbedingt mattsetzen, um zu gewinnen. Es genügt, ihm alle seine Mannen zu schlagen.

Einerseits ist Chex einfacher und übersichtlicher als Schach. Andererseits zwingt es den Spieler wegen der ungewohnten Möglichkeiten zum radikalen Umdenken. Noch ist es ein Dschungel, in dem es vieles Interessante zu erforschen gilt. Es gibt weder Lehrbücher noch Computerprogramme, die einen durch ihre Unschlagbarkeit frustrieren.

In dem großen Internet-Verzeichnis der Schachvarianten www.chessvariants.com/Gindex.html finden sich zwar etliche Spiele auf Bienenwabenfeldern, aber keines, das dem hier vorgestellten nahekäme. Gleichzeitig macht dieses Verzeichnis klar, dass es bis zur allgemeinen Anerkennung für Chex noch ein weiter Weg ist. Es gibt so viele Schachvarianten, dass die Autoren der Website es für zweckmäßig gehalten haben, die besseren Varianten in fünf Ruhmesklassen einzusortieren. In der höchsten (»Classic«) gibt es außer Schach selbst nur zwei Spiele, in der zweithöchsten (»Vintage«) immerhin elf. Das sind diejenigen, die mehrere Jahre nach dem Tod ihres Erfinders immer noch populär sind.

Probieren Sie das Spiel aus und geben Sie Ihre Kommentare auf der Webseite dieses Artikels www.spektrum.de/artikel/893114 ab! Ein Chex-Brett zum Selbstausdrucken steht unter derselben Adresse als PDF-Datei bereit. Es wird spannend sein zu sehen, ob Chex das Zeug hat, unter die berühmteren Schachvarianten aufzusteigen. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893114.

AUTOR

Die Quadratwurzel, das Irrationale und der Tod

Es ist eine höchst rationale Idee, Irrationales dort einzubringen, wo Rationalität stets dominieren sollte: in der europäischen Politik.

Von Christoph Pöppe

Die Vorstellung, man könne die Welt durch rationale Zahlen erfassen, haben schon die alten Griechen widerlegt

Alles ist Zahl«, sagten die Pythagoräer und meinten damit: Alle wichtigen Dinge der Welt, angefangen mit den harmonischen Intervallen der Musik, lassen sich als Verhältnisse ganzer Zahlen ausdrücken – das, was wir »rationale Zahlen« nennen. Die hehre Idee scheiterte bereits am Verhältnis von Diagonale zu Seitenlänge eines biederen Quadrats: Die Quadratwurzel von 2 ist irrational. Angeblich waren die Pythagoräer bereit, alles zu tun, damit diese erschreckende Erkenntnis nicht an die Öffentlichkeit gelangte – und ersäuften den, der sie ausgeplaudert hatte.

»Sterben für die Quadratwurzel« ist also keine ganz neue Idee. Aber wenn im Vorfeld des jüngst vergangenen EU-Gipfels die polnischen Regierungsbrüder Kaczyński ein derart martialisches Opfer ankündigten: Wofür genau waren sie bereit, ihr Leben zu lassen? Für eine nette kleine mathematische Funktion, die im Reich der Ideen auch ohne solch heroischen Einsatz mühelos überleben würde? Wohl kaum. Für die Irrationalität schlechthin? Im öffentlichen Getöse konnte dieser Eindruck wohl aufkommen. In demselben Lärm ist aber eine wesentliche Nachricht fast untergegangen: Unter allen Lösungen des Problems ist die mit der Quadratwurzel wahrscheinlich die vernünftigste überhaupt.

Es geht um die Machtverteilung im Ministerrat der Europäischen Union, einem Gremium mit erheblichen Entscheidungsbefugnissen. Im Gegensatz zum Europäischen Parlament, in das jedes Land eine Anzahl von Abgeordneten entsendet, die – bis auf Rundungsfehler – proportional seiner Einwohnerzahl ist, sitzt im Ministerrat pro Land nur ein Vertreter. Nach dem Vertrag von Nizza haben die größeren Länder mehr Stimmen als die kleineren; die genauen Anzahlen wurden in zermürbenden Nachtsitzungen ausgehandelt und weisen einige Umgereimtheiten auf.

In dem gescheiterten Entwurf einer europäischen Verfassung, deren Inhalte in ein neues, zurzeit diskutiertes Vertragswerk übernommen werden sollen, gibt es keine Zuweisung von Stimmgewichten an einzelne Länder mehr. Vielmehr gilt das Prinzip der »doppelten Mehrheit«: Eine Vorlage gilt als angenommen, wenn eine Mehrheit von mindestens 55 Prozent der Staaten ihr zustimmt – jeder Staat hat dabei eine Stimme – und die zustimmenden Staaten mindestens 65 Prozent der Bevölkerung repräsentieren.

Die Quadratwurzelformel ist ein Verfahren, den einzelnen Staaten Stimmgewichte zuzuweisen, und daher zunächst am ehesten mit den Vorgaben des Vertrags von Nizza vergleichbar. An ihrer Ausarbeitung hat ausgerechnet ein Deutscher wesentlichen Anteil. Werner Kirsch, Professor für mathematische Physik in Bochum, hat eine 1946 erschienene Arbeit des britischen Arztes, Genetikers und Mathematikers Lionel Penrose (1898–1972) aufgegriffen und weiterentwickelt (es handelt sich um den Vater des Mathematikers Roger Penrose). Der Mathematiker Wojciech Słomczyński und der Physiker Karol Życzkowski, beide von der Jagiellonischen Universität Krakau, haben diese Gedanken weitergeführt; ihr Ergebnis ist als »Jagiellonischer Kompromiss« bekannt geworden.

Wie kommt Penrose zu seiner Wurzel?

Nach der Theorie Penroses wird ein Machtgleichgewicht unter allen EU-Bürgern genau dann erreicht, wenn das Stimmgewicht jedes Landes proportional zur Quadratwurzel seiner Einwohnerzahl ist.

Wie kann das sein? Warum soll man überhaupt von dem guten alten Prinzip »one man, one vote« (neuerdings politisch korrekt: »one person, one vote«) abgehen?

Die erste, vorläufige Antwort ist: weil die Macht in einem Gremium wie dem Ministerrat, in dem verschiedene Mitglieder verschiedene Stimmgewichte haben, nicht einfach proportional diesem Stimmgewicht ist. Ein einfaches Gegenbeispiel ist ein Gremium – sagen wir eine Aktiengesellschaft –, in der ein Mitglied über die Mehrheit der Stimmen verfügt. Offensichtlich sind dann die Stimmen aller anderen Mitglieder nichts wert, selbst wenn sie nahezu 50 Prozent ausmachen.

Wie groß ist also die Macht eines Gremienmitglieds? Eine von mehreren denkbaren Antworten ist der Banzhaf'sche Machtindex (Spektrum der Wissenschaft 11/1993, S. 12, und 1/1987, S. 32). Man nehme ein Mitglied x aus dem Gremium heraus und bilde alle möglichen Aufteilungen der restlichen Mitglieder in zwei »Lager«, sagen wir die Zustimmer und die Ablehner. Der Banzhaf'sche Machtindex des Mitglieds x ist der Anteil derjenigen Aufteilungen, in denen das Stimmverhalten von x den Ausschlag gibt, x also das »Zünglein an der Waage« ist.

Idealisieren wir nun den Entscheidungsprozess innerhalb des Ministerrats ein wenig. Es werden nur Fragen vorgelegt, zu denen man »Ja« oder »Nein« sagen kann. Der Vertreter jedes Landes fragt vor jeder Entscheidung sein Volk und stimmt dann so ab, wie dessen Mehrheit es will. Welche Macht hat bei dieser Volksbefragung der einzelne Bürger?

Nicht viel, und je größer das Volk ist, desto weniger. Aber es ist nicht so viel weniger, wie man erwarten würde.

Meine Stimme gibt genau dann den Ausschlag, wenn der Rest meines Volkes in zwei genau gleich große Lager gespalten ist. Idealisieren wir noch etwas weiter: Alle meine Mitbürger bilden sich ihre Meinung unabhängig voneinander, und sie kreuzen mit gleicher Wahrscheinlichkeit »Ja« oder »Nein« auf dem Stimmzettel an. Dann gibt es bei n Wahlberechtigten (mich selbst nicht mitgerechnet) zwar 2^n mögliche Wahlausgänge, darunter aber gar nicht so wenige, bei denen es auf mich ankommt; diese Anzahl ist gleich dem Binomialkoeffizienten von n und $n/2$, und nach einigem Herumrechnen mit der Stirling'schen Formel für Fakultäten großer Zahlen stellt sich heraus: Mein persönlicher Machtindex ist nicht proportional zu $1/n$, sondern zur Wurzel aus $1/n$.

Innerhalb meines Landes ist dieser Zahlenwert bedeutungslos, denn meinen Mitbürgern geht es genauso wie mir. Auf europäischer Ebene sollte ich jedoch dieselbe Macht haben wie mein Mitbürger aus den Nachbarstaaten. Damit das hinkommt, muss die Stimme meines Landes mit $\sqrt{n}$ multipliziert werden – und eben nicht mit n, wie es dem Prinzip »one person, one vote« entspräche. Das ist die Begründung für die Wurzelformel von Penrose.

Die Argumentation weist dem Fall, dass es in ganz Deutschland ausgerechnet auf meine Stimme ankommt, eine zentrale Bedeutung zu. Das ist auf den ersten Blick sehr dubios. Der Fall kommt nicht nur in der Praxis nicht vor, er wäre auch höchst verderblich. Eine Kampfabstimmung mit so hauchdünner Mehrheit hinterlässt in aller Regel so viele Verwundete, dass ein kluger Versammlungsleiter alles tun wird, um sie zu vermeiden.

Der Wähler als kleiner Spin

Es ist Kirsch gelungen, den Grundgedanken hinter Penroses Herleitung etwas plausibler zu fassen. Warum soll man überhaupt von der schlichten Proportionalität abweichen? Weil die Stimmen jedes Landes einheitlich abgegeben werden. Damit fallen die Meinungen derjenigen Bürger, die in ihrem eigenen Land in der Minderheit sind, unter den Tisch. Wie in jedem mehrstufigen Entscheidungsverfahren kann auf diesem Weg der Wille der Gesamtbevölkerung in sein Gegenteil verkehrt werden: Eine Mehrheit der Amerikaner hatte im November 2000 Gore gewählt, gleichwohl wurde Bush Präsident, eben weil eine (möglicherweise knappe) Mehrheit in einem Bundesstaat sämtliche Wahlmännerstimmen des Staats auf die Seite dieser Mehrheit bringt.

Vom Standpunkt eines aufrechten Demokraten ist das die größte denkbare Katastrophe. Also gilt es, die Differenz zwischen den Mehrheitsverhältnissen im Volk (sprich allen Wählern Europas) und denen im Gremium (dem Ministerrat), das so genannte Mehrheitsdefizit, möglichst klein zu halten.

Das ist eine klassische Minimierungsaufgabe; sie wird zu einem definierten mathematischen Problem, wenn man geeignete Annahmen über das Verhalten der Wähler macht. An dieser Stelle greift Kirsch auf die Modelle zurück, die ihm als statistischem Physiker geläufig sind: Spinsysteme. Ein Spin ist in dieser Abstraktion nichts weiter als ein kleines Teilchen, das den Zustand 1 oder –1 annehmen kann, wie eben ein Wähler, der zu einer politischen Frage »Ja« oder »Nein« sagt. Unter der Annahme, dass alle diese Teilchen ihre Zustände unabhängig voneinander annehmen und mit gleicher Wahrscheinlichkeit »Ja« wie »Nein« sagen, stellt sich heraus: Die Lösung der Mini- ▷

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Der Satz des Pythagoras auf europäischer Ebene. Deutschland hat ungefähr so viel Einwohner wie Polen und Spanien zusammen; die Fläche der (quadratisch gemachten) Landeswappen ist proportional der Einwohnerzahl. Nach der Formel von Penrose ist das Stimmrecht jedes Staates nicht proportional der Fläche, sondern der Seitenlänge des Quadrats; Spanien und Polen zusammen könnten also Deutschland mühelos überstimmen.

▷ mierungsaufgabe ist die Wurzelformel. Bestimmt man nach ihr die Stimmstärken des Gremiums, so minimiert man das Mehrheitsdefizit und damit die Wahrscheinlichkeit, dass eine Entscheidung im Ministerrat dem Willen der Mehrheit der EU-Bürger widerspricht.

Dieses Ergebnis hat eine interessante politische Interpretation. Das kann schon sein, dass die Brüder Kaczyński sich für die Wurzelformel ins Zeug legen, um damit die Deutschen zu deckeln. Nur: Die Wurzelformel schützt nicht nur die Polen vor der Übermacht der Deutschen, sondern vielleicht auch eine Minderheit der Deutschen vor der Mehrheit der Deutschen. Nehmen wir an, zu einer bestimmten Frage sagen alle Polen »Ja«, aber 52 Prozent der Deutschen »Nein« und 48 Prozent »Ja«. Vertreter beider Länder halten sich an die Mehrheit im jeweils eigenen Land; das ergibt selbst nach der Wurzelformel mehr Nein- als Ja-Stimmen. Immerhin ist die Differenz geringer als nach der proportionalen Stimmgewichtung, sodass die Chance für ein Endergebnis »ja« bei Auszählung aller Länderstimmen etwas größer ist.

Natürlich ist die Meinung eines Menschen keine Zufallsgröße. Aber sie für eine solche zu halten, ist eine ebenso segensreiche Fiktion wie die Idee von der Gleichheit aller Menschen

Für Deutschland und Polen zusammengenommen entspräche das Ergebnis »Ja« sogar dem Willen einer großen Mehrheit. Die 48 Prozent der Deutschen, deren Stimmen unter den Tisch fallen, sind schließlich etwas mehr als alle Polen zusammen. Es wäre im Sinne der Demokratie, wenn deren Meinung auf dem Umweg über die polnischen Stimmen doch noch zur Geltung käme. Und da die Deutschen in ganz Europa tendenziell die größten Minderheiten haben (sie haben nämlich die größte Einwohnerzahl), muss man diese Minderheiten am intensivsten schützen, indem man das Stimmgewicht der Deutschen am stärksten deckelt.

Nun ist die Annahme, die Wähler seien nichts weiter als unabhängige, identisch verteilte Zufallsgrößen, immer noch ziemlich fern der Realität. Nationale Traditionen spielen eine erhebliche Rolle und erklären, warum die Wähler abhängig von dem Land, aus dem sie kommen, dieselbe Frage höchst unterschiedlich beantworten; außerdem neigen Wähler ohne klare Präferenzen dazu, sich den Meinungsführern ihres Landes anzuschließen. Aber Kirsch hat für diese Fälle die Modellierungswerkzeuge der Vielteilchenphysik bereits in der Kiste: Eine meinungsbildende Instanz wie die katholische Kirche wirkt wie ein externes Magnetfeld, das die Spins in eine bestimmte Richtung auszurichten trachtet. Dass Spins sich ihren Nachbarn anzugleichen versuchen, ist ein beliebtes Modell für magnetische Kristalle. Beides kann man durchrechnen und kommt zu dem Ergebnis, dass unter derartigen Umständen die optimale Verteilung der Stimmgewichte vom Quadratwurzelgesetz in Richtung auf das Prinzip »one person, one vote« abweicht. Zu allem Überfluss kann man aus dem vergangenen Wahlverhalten der Bevölkerung erschließen, ob es sich um eine eher individualistische oder eher uniforme Gesellschaft handelt, und die Formel entsprechend anpassen.

Ein Kontinuum von Stimmgewichtsformeln

Damit schält sich ein Gesamtbild heraus. Es gibt die Extrempositionen »one person, one vote« und »one country, one vote«. Letztere wird in der Reinform nicht ernsthaft vertreten. Niemand will Malta so viel Macht geben wie Deutschland. Gleichwohl gibt es für diese Position gute Argumente: Staaten haben ein Eigenleben und sollten deshalb als solche und nicht nur kraft ihrer Einwohnerzahl ein gewisses Stimmgewicht bekommen.

Suchen wir also einen Mittelweg zwischen den beiden Extremen. Das geht ganz einfach. Das Stimmgewicht eines Landes mit n Einwohnern sei Cn^a. Dabei ist C ein eher unbedeutender Normierungsfaktor, mit dem man die Gesamtsumme der Stimmgewichte auf einen gewünschen Wert bringen kann. Der Exponent a ist eine Zahl zwischen 0 und 1; dabei entspricht der Extremwert 0 dem Prinzip »one country, one vote« und der Wert 1 dem Prinzip »one person, one vote«. Und siehe da: Das geschmähte Quadratwurzelgesetz liegt mit $a = 1/2$ genau in der Mitte!

Es kommt noch ein weiterer interessanter Zusammenhang hinzu. Alle Formeln der Gestalt Cn^a erfüllen eine Bedingung, die der französische Mathematiker Michel Balinski »Kohärenz« nennt. Wie er in seinem Artikel »Die Mathematik der Gerechtigkeit« (Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 90, wieder abgedruckt im Dossier 5/2006 »Fairness, Kooperation, Demokratie«, S. 24) erläutert, ist Kohärenz eine notwendige Bedingung dafür, dass ein Zuteilungsverfahren von allen Beteiligten als gerecht empfunden wird und vor allem nachträglichen Wünschen nach Umverteilung keine Rechtfertigung liefert.

Auf Balinskis Artikel hin hat unser Leser Josef Lamprecht die im Vertrag von Nizza festgelegten Stimmgewichte für die Staaten der EU durch die Formel Cn^a auszudrücken versucht (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 7). Die beste Anpassung gelang mit dem Wert $a = 0{,}555$, also geringfügig oberhalb des Quadratwurzelgesetzes.

Über den Wert des Exponenten a hinaus steht den Konstrukteuren der Abstimmungsprozedur eine weitere Stellschraube zur Verfü-

gung: das so genannte Quorum, also der Prozentsatz aller Stimmen, der für die Annahme einer Vorlage erforderlich ist. Ein Quorum von 50 Prozent entspricht der schlichten Mehrheitsentscheidung; für bedeutende Entscheidungen (in Deutschland: Verfassungsänderungen) ist häufig ein Quorum von 66,7 Prozent, die Zweidrittelmehrheit, erforderlich.

Dazu haben die beiden Krakauer Wissenschaftler durch Probieren eine interessante Entdeckung gemacht (die zurzeit noch eines mathematischen Beweises harrt): Zu einer gegebenen Menge von Staaten samt deren Einwohnerzahlen gibt es genau ein Quorum mit der Eigenschaft, dass der Banzhaf'sche Machtindex jedes Staates gleich seinem Stimmgewicht ist. Dieses Quorum kann man nach einer einfachen Formel ausrechnen. Es ist tendenziell umso kleiner, je größer die Gesamtzahl der Staaten ist, und nähert sich für sehr große Zahlen dem Wert 1/2 entsprechend dem einfachen Mehrheitsprinzip. Damit bleibt die Entscheidungsfähigkeit des Gremiums auch bei großen Mitgliederzahlen erhalten, weil es schwieriger wird, eine Sperrminorität aufzubauen. Słomczyński und Życzkowski haben auf diesem Weg eine Automatik bereitgestellt, die bei der nächsten Erweiterung der EU jegliche Verhandlungen erübrigt: Die neuen Stimmgewichte und das neue Quorum werden einfach ausgerechnet; Taschenrechner genügt.

Konsens auf höherem Niveau

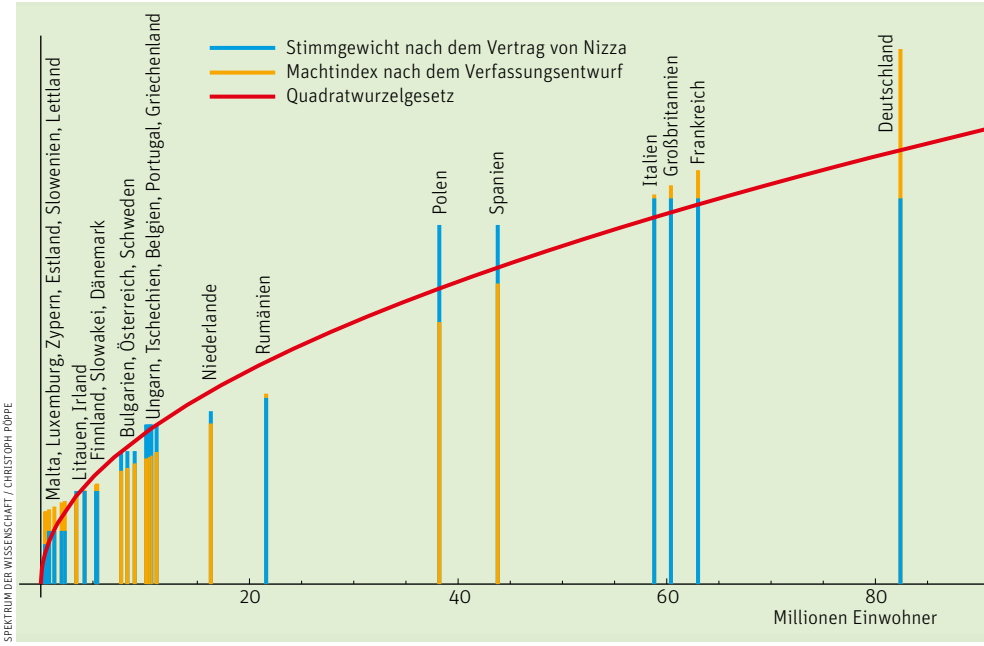
Ein Vergleich (Bild oben) zeigt, dass die Vorstellungen der europäischen Regierungen, abzulesen am Vertrag von Nizza einerseits und am Verfassungsentwurf andererseits, vom Quadratwurzelgesetz nicht sonderlich weit entfernt sind. Dass die Entscheidungsmacht eines Staates langsamer ansteigen muss als proportional zur Bevölkerungszahl, scheint Konsens; die Regel »one person, one vote« steht überhaupt nicht zur Debatte. Wenn diese Regierungen sich dazu durchringen könnten, dieses Gesetz zu praktizieren – vielleicht mit einem etwas höheren Exponenten –, würden sie die Diskussion von der Ebene der Interessen einzelner Länder auf ein höheres, abstrakteres Niveau transportieren. Dort sollte sich ein Konsens deutlich leichter finden lassen. Zum Beispiel macht der Vergleich mit der Quadratwurzelformel handfest, was bislang nur diffus in den Köpfen der Beteiligten grummelte: Nach dem Vertrag von Nizza kommen Polen und Spanien zu gut weg, Deutschland zu schlecht. Der Verfassungsentwurf macht genau den umgekehrten Fehler.

Wohlgemerkt: Die Mathematik erhebt zwar zu Recht den Anspruch, ewige Wahrheiten zu produzieren; aber die Quadratwurzelformel ist trotz ihrer mathematischen Herkunft alles andere als eine ewige Wahrheit. Sie basiert auf einem mathematischen Modell mit offenkundigen Schwächen.

Ein mathematisches Hilfsmittel wie Penroses Wurzelformel oder der darauf aufbauende Jagiellonische Kompromiss kann und muss seine Legitimität nicht aus irgendwelchen wilden Modellvorstellungen ziehen – selbst wenn man diesen Modellvorstellungen zugutehält, dass es derzeit keine besseren gibt. Eigenschaften wie Einfachheit, Transparenz, Willkürfreiheit, Kohärenz und Praktikabilität müssen zur Not genügen. Nicht vergessen: Die theoretische Begründung des allgemein anerkannten Mehrheitsprinzips ist nicht wesentlich besser, und die zu Grunde liegende Modellvorstellung, alle Menschen seien gleich, ist ebenfalls weit von der Realität entfernt.

In einem Fall ist es Michel Balinski und seinem Augsburger Fachkollegen Friedrich Pukelsheim schon gelungen, mit einem einleuchtenden mathematischen Algorithmus Stimmenzahl-Zuweisungsprobleme für alle Beteiligten überzeugend und konsensfähig zu lösen (Spektrum der Wissenschaft 4/2007, S. 76). Das Gremium war zwar deutlich kleiner: der Zürcher Gemeinderat. Aber eine ähnliche Anstrengung auf europäischer Ebene wäre sicherlich der Mühe wert.

Die europäischen Bürokraten müssten sich allerdings mit so ungewohnten Dingen wie Quadratwurzeln oder, schlimmer noch, Potenzen mit nicht-ganzen Exponenten zwischen 0 und 1 anfreunden. Nur keine Panik! Wenn man sich erst einmal daran gewöhnt hat, ist es nicht wirklich schwer. Entsprechende Tasten finden sich auf den meisten Taschenrechnern. ◁



So viel Anteil an der Macht hätten die 27 Staaten der Europäischen Union nach dem gegenwärtig gültigen Vertrag von Nizza, nach dem Verfassungsentwurf und nach der Quadratwurzelformel. Die Maßstäbe wurden so gewählt, dass die Summe der einzelnen Größen (Stimmgewichte beziehungsweise Machtindizes) jeweils gleich 1 ist. Der Regel »one person, one vote« entsprächen Balken, deren obere Enden auf einer Geraden durch den Nullpunkt liegen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Physics for fairer voting. Von Karol Życzkowski, Wojciech Słomczyński und Tomasz Zastawniak in: Physics World, S. 35, März 2006

Penrose voting system and optimal quota. Von Wojciech Słomczyński und Karol Życzkowski in: Acta physica polonica B, Bd. 37, Nr. 11, S. 3133, 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893111.